

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Katedra elektroenergetiky**

**Návrh jističe**

**Proposoal circuit breaker**

**2012**

**Bc. Adam Reisig**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Adam Reisig**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Návrh jističe nn**  
**Propoal circuit breaker**

Zásady pro vypracování:

1. Navrhnete jistič nn pro všeobecné použití pro rozsah jmenovitých proudů 10 až 25 A.
2. V rámci návrhu realizujete:
  - Rozbor konstrukční koncepce jističe v modulárním provedení.
  - Návrh základních rozměrů jističe.
  - Kontrolní výpočet na silové účinky zkratového proudu 10kA.
  - Tepelný výpočet ustáleného oteplení jmenovitým proudem.
  - Principiální návrh zhášecí komory.
  - Výkres sestavy pólu jističe.
3. Porovnejte výsledky návrhu s jističi dostupnými na trhu.

Seznam doporučené odborné literatury:


Dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení:**

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne

3. 5. 2012

Podpis

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized, cursive script that appears to be 'Mig' followed by a long, sweeping underline.

Děkuji vedoucímu této diplomové práce Ing. Zdeňkovi Hytkovi CSc. za vedení práce a věcné připomínky.

## Abstrakt

Při návrhu elektrického přístroje (jističe), jsem se zabýval dvěma problémy, elektrodynamickými účinky zkratového proudu  $I_d = 10000$  A a řešením oteplení při průchodu jmenovitého proudu  $I_n = 25$  A. Pro řešení elektrodynamických sil, jsem vytvořil model proudovodné dráhy jističe a z něho jsem vygeneroval tzv. zjednodušený model dráhy, dle kterého se návrh vypočítává. Konečným řešením sil, získám velikost a směr působící síly na kontaktní přítlak. Při řešení oteplení vycházím opět z vytvořeného modelu a krytu jističe, kterým teplo přestupuje do okolí. Uvažuji, že se celkové teplo vytvořené na proudovodné dráze odvede pouze přední stranou krytu. Na závěr tepelné problematiky jsem vytvořil tepelnou síť, dle které ověřím dovolené oteplení. V další části se zabývám návrhem zhašecí komory. Výpočet stanovuje potřebný počet žeber pro omezení zkratového proudu.

## Klíčová slova

Proudovodná dráha, jistič, kontaktní styk, tepelný odpor, elektrodynamická síla

## Abstract

In the design of electrical equipment (circuit breakers), I dealt with two problems, electrodynamic effects of short circuit current  $I_d = 10000$  A and warming solution when passing rated current  $I_n = 25$  A. For the solution of electrodynamic forces, I created a model of current-carrying circuit paths, and out of this I generated a simplified model of the track, according to which the proposal is counted. With the ultimate solution of forces, I get the size and direction of forces acting on the contact pressure. In the case of warming solution I come out from the created model and the shield of circuit breakers which passes heat to the surroundings. I consider the fact that the total heat generated in the current-carrying path will be diverted only by the front cover. At the end of the heat problematics I created a heat network with the help of which I check allowed warming. The following part deals with the proposal of quenching chamber. The solution determines the necessary number of ribs for limiting the short circuit current.

## Key words

Current carrying path, circuit breaker, contacting, thermal resistance, electrodynamic force

## Seznam použitých symbolů

Značka	Název veličiny	Jednotka
A	ochlazovací povrch	(m <sup>2</sup> )
AC	střídavé napětí	(V)
B <sub>x</sub>	indukce magnetického pole	(T)
C	materiálová konstanta	(-)
D	průměr půlkruhové hladiny proudové úžiny	(m)
E <sub>z</sub>	emisivita	(-)
F	síla	(N)
F <sub>nepřispívající</sub>	nepřispívající síla na kontaktní styk	(N)
F <sub>přispívající</sub>	přispívající síla na kontaktní styk	(N)
H	tvrdost materiálu	(MPa)
I	elektrický proud	(A)
I <sub>d</sub>	maximální zkratový proud	(A)
I <sub>zef</sub>	efektivní hodnota zkratového proudu	(A)
L	indukčnost	(H)
O <sub>i</sub>	chladicí obvod izolace	(m)
O <sub>v</sub>	chladicí obvod	(W)
P	tepelný výkon	(W)
P <sub>i</sub>	chladicí povrch izolace	(m <sup>2</sup> )
P <sub>vod</sub>	chladicí povrch vodiče	(m <sup>2</sup> )
Q <sub>1</sub>	tepelný výkon	(W)
R	elektrický odpor	(Ω)
R <sub>s</sub>	stykový odpor	(Ω)
R <sub>TJ</sub>	tepelný odpor vzduchu	(K.W <sup>-1</sup> )
R <sub>TI</sub>	tepelný odpor v longitudinální větvi	(K.W <sup>-1</sup> )
R <sub>T-polyamid</sub>	tepelný odpor krytu jističe	(K.W <sup>-1</sup> )
R <sub>TT</sub>	tepelný odpor v transversální větvi	(K.W <sup>-1</sup> )
S <sub>x</sub>	průřez	(m <sup>2</sup> )
T <sub>x</sub>	teplota	(°C)
U	elektrické napětí	(V)
U <sub>m</sub>	napětí měknutí	(V)
U <sub>s</sub>	napětí svaření	(V)
V	objem	(m <sup>3</sup> )
W	energie elektrického pole	(J)

a	vzdálenost	(m)
c	objemová tepelná kapacita	(J/m <sup>3</sup> . K)
d	průměr	(m)
h	výška	(m)
i	elektrický proud	(A)
k	materiálová konstanta	(-)
k <sub>b</sub>	činitel jevu blízkosti	(-)
k <sub>d</sub>	činitel jevu uspořádání vodičů konečné délky	(-)
k <sub>p</sub>	činitel tvaru průřezu	(-)
k <sub>p</sub>	činitel povrchového zhuštění	(-)
l	délka	(m)
m	vzdálenost	(m)
n	vzdálenost	(m)
p	vzdálenost	(m)
r	vzdálenost	(m)
s	vzdálenost	(m)
t	čas	(s)
Δθ	okamžité oteplení tělesa	(K)
α <sub>01-10</sub>	náhradní měrná chladivost	(W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )
α <sub>k</sub>	měrná chladivost konvekcí	(W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )
α <sub>kzx</sub>	celková hodnota chladivosti	(W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )
α <sub>z</sub>	měrná chladivost zářením	(W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )
δ	veličina náhradního π-článku	(-)
δ <sub>d</sub>	dovolené namáhání materiálu	(MPa)
λ <sub>e</sub>	ekvivalentní hodnota tepelné vodivosti	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
Ω <sub>Cu</sub>	elektrická rezistivita mědi	(Ω.m)
τ	časová konstanta	(s)

## Seznam použitých zkratk

ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
IEC	International Electrotechnical Commission

# Obsah

<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1 VÝZNAM JIŠTĚNÍ.....</b>	<b>2</b>
<b>2 ROZDĚLENÍ JISTIČŮ DLE VELIKOSTI PŘENÁŠENÉHO PROUDU .....</b>	<b>3</b>
2.1 MALÉ JISTIČE.....	3
<b>3 KONSTRUKČNÍ ČLENĚNÍ.....</b>	<b>5</b>
3.1 ZÁKLADNÍ DÍLY JISTIČE .....	6
3.2 PROUDOVODNÉ ČÁSTI.....	6
3.3 IZOLACE PŘÍSTROJE .....	7
3.4 MECHANISMUS .....	8
3.5 ZHÁŠEDLA .....	8
3.6 VÝZBROJ .....	8
<b>4 ŘEŠENÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ ELEKTRICKÉHO PROUDU .....</b>	<b>9</b>
4.1 SILOVÉ ÚČINKY MEZI NĚKOLIKA PROUDOVÝMI DRAHAMI .....	9
4.2 SILOVÉ ÚČINKY PŘI ZAKŘIVENÍ PROUDOVÉ DRÁHY .....	12
4.3 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY VYVOLANÉ ZMĚNOU INDUKČNOSTI OBVODU .....	14
4.4 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY VYVOLANÉ ZMĚNOU PRŮŘEZU VODIČE .....	15
4.5 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY PROUDOVÉ DRÁHY V BLÍZKOSTI FEROMAGNETICKÉHO ROZHRANÍ.....	16
<b>5 TEPELNÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU .....</b>	<b>18</b>
5.1 OTEPLOVÁNÍ PROUDOVODIČE .....	18
5.2 ODPOR VODIČE .....	19
<b>6 PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>21</b>
6.1 ZÁKLADNÍ STAVEBNÍ SMĚRNICE .....	21
6.1.1 Další stavební směrnice .....	21
6.2 IZOLACE .....	22
6.3 VÝPOČET DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ ZKRATOVÉHO PROUDU.....	22
6.3.1 Výpočet odpudivé elektrodynamické síly v kontaktní úžině.....	24
6.3.2 Výpočet síly mezi svorkou jističe a zkratovou spouští.....	25
6.3.3 Výpočet síly mezi zkratovou spouští a pevným kontaktem.....	26
6.3.4 Výpočet síly mezi svorkou a pevným kontaktem.....	26
6.3.5 Výpočet síly mezi pohyblivým kontaktem a lankovým vodičem k bimetalu .....	27



6.3.6	<i>Výpočet síly mezi bimetalovou spouští a lankovým vodičem spojující pohyblivý kontakt s bimetalovou spouští</i>	28
6.3.7	<i>Síla mezi bimetalovou spouští a lankovým vodičem spojující bimetalový pásek s výstupní svorkou</i>	28
6.3.8	<i>Síla mezi lankovým vodičem a výstupní svorkou</i>	28
6.3.9	<i>Síla mezi pohyblivým kontaktem a bimetalovou spouští</i>	29
6.3.10	<i>Síla mezi bimetalovou spouští a výstupní svorkou jističe</i>	29
6.3.11	<i>Síla mezi pohyblivým kontaktem a výstupní svorkou jističe</i>	29
6.3.12	<i>Síla mezi pohyblivým kontaktem a spojem mezi bimetalovou spouští a výstupní svorkou</i>	30
6.3.13	<i>Výpočet stykového odporu a tlaku</i>	31
6.3.14	<i>Výpočet síly pro návrh mechanismu</i>	32
6.4	OTEPLENÍ JMENOVITÝM PROUDEM	33
6.4.1	<i>Elektrický odpor proudovodné dráhy</i>	34
6.4.2	<i>Chlazení přes uzavřený prostor</i>	34
6.4.3	<i>Tepelný výpočet přívodu</i>	35
6.4.4	<i>Tepelný výpočet svorky</i>	38
6.4.5	<i>Tepelný výpočet zkratové spouště</i>	41
6.4.6	<i>Tepelný výpočet pevného kontaktu</i>	43
6.4.7	<i>Tepelný výpočet pohyblivého kontaktu</i>	46
6.4.8	<i>Tepelný výpočet bimetalové spouště</i>	48
6.4.9	<i>Tepelný výpočet spoje lankových vodičů</i>	51
6.4.10	<i>Tepelný výpočet šroubového spoje</i>	51
6.5	TEPELNÁ SÍŤ	52
6.5.1	<i>Výpočet 1. uzlu tepelné sítě</i>	52
6.6	PRINCIPIÁLNÍ NÁVRH ZHÁŠECÍ KOMORY	53
7	<b>ZÁVĚR</b>	<b>54</b>
8	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b>	<b>56</b>
9	<b>PŘÍLOHA</b>	<b>57</b>

## Úvod

V dnešní době, kdy je společnost závislá na elektrické energii a kdy při výrobě a rozvodu elektrické energie mají svůj velký význam elektrické přístroje, kterými celou energetickou soustavu ovládáme, řídíme a především chráníme, provedeme návrh domovního jističe 25A a kontrolní výpočet elektrodynamických sil při průchodu zkratového proudu 10 000 A. Dále se budeme zabývat tepelným výpočtem námi navrhovaného jističe při průchodu jmenovitého proudu.

Při návrhu spínacího přístroje se snažíme docílit, aby navrhovaný vypínač byl co nejjednodušší, levný, zaručeně bezpečný a spolehlivý. Jistič patří mezi základní přístroje, kterými lze chránit obvod a zajistit ovládání spotřebičů.

Spínací přístroje lze z konstrukčního pohledu rozdělit na pět základních částí: proudovodná dráha, kterou v rámci návrhu jističe budeme modelovat v 3D programu SolidWorks. Z konečné podoby modelu proudovodné dráhy budeme vycházet jak při výpočtech elektrodynamických sil, tak při řešení oteplení. Další konstrukční částí je izolační systém u námi navrhovaného jističe se jedná o polyamidový kryt, kterým teplo přestupuje do okolí. Mechanismu jakožto třetí konstrukční část v rámci diplomové práce neřešíme, avšak dle dostupných informací od projektantů elektrických přístrojů se jedná o nejsložitější část v rámci návrhu spínacího přístroje. Jedná se především o zaručeně bezpečný chod celého systému, jelikož přes 80% poruch je způsobeno závadou mechanismu. Zhášedlo budeme v našem projektu řešit pouze z pohledu principiálního návrhu zhášecí komory. Výpočet provedeme na základě znalostí formule paní Ayertenové o elektrickém oblouku. Jedná se pouze o nastínění řešení v rámci počtu zhášecích roštů. V praktickém návrhu se tato problematika z podstatné části řeší na zkušebnách, kde výrobci používají experimentální metodu. Pátou částí je výzbroj (ověšení), která není součástí této práce.

Práce bude doplněna výkresy pro přehlednou orientaci v dosazovaných rozměrech. Koncepční návrh bude vycházet z jističů, které nalezneme na dnešním trhu s elektroinstalačním materiálem.

# 1 Význam jištění

„Jištění elektrických zařízení je závažný technickoekonomickým úkolem. Tímto pojmem se rozumí využití částí, které chrání elektrické zařízení před účinky poruchových proudů a napětí. Umožňují tak navrhování vylučující zbytečné předimenzování zařízení. Přitom se očekává, že jistící přístroje budou co nejjednodušší, a tedy levné, a přesto spolehlivé. Protože nadproudy představují rozsáhlé spektrum hodnot v rozmezí jmenovitého proudu až 104 násobku jmenovitého proudu a různou dobu trvání v rozmezí  $10^{-2}$  s až desítek minut, je rovněž požadována hospodárná výroba a hospodárného počtu typů jisticích přístrojů, které lze přizpůsobit místním podmínkám sítě.

Před účinky nadproudů jistíme elektrická zařízení tavnými pojistkami a samočinnými spínacími přístroji nazývanými jističe.“[1]

Požadavek možnosti ovládání provozu spotřebičů při zachování jisticí funkce vedl ke spojení funkce spínače a pojistky do jednoho celku, který známe pod názvem jistič. Známé nevýhody pojistek u malých nadproudů jako je například dlouhá doba tavení a dalším specifickým nedostatkem pojistek je okolnost, že následkem výrobních tolerancí, materiálových vlastností kolísajících s vlivem měnící se teploty okolí není charakteristikou pojistky, jednoznačná křivka, ale pásmo. [1]

„Zmíněné nevýhody mohly být přitom vyřešeny jinými způsoby jištění. Jistič musí jistit jak síť, tak spotřebiče, nesmí se poškodit ani při přerušování velkých nadproudů, aby byl schopen nového zapnutí. Vykazuje tedy velkou vypínací schopnost. Není však vhodný k častému spínání. Vypínání zajišťuje pružina, která se při zapnutí napne. Protože však napnutá pružina stále tlačí pohyblivé kontakty do vypnuté polohy, je nutné zapnutou polohu zajistit zámkem. Jeho uvolnění se dosáhne působením řídicích článků, které kontrolují změnu některé fyzikální veličiny zvolené vhodně vzhledem k druhu poruchového stavu a po dosažení podmínky vypnutí dávají popud k uvolnění zámku. Jističe pro malé jmenovité proudy mají zámkový jednoduchého provedení, nejčastěji jako západky nebo prolomené páky. U jističů pro velké jmenovité proudy s mohutnými vypínacími pružinami je požadavek malé síly k vybavení zámku řešen volnoběžkami, což je v podstatě soustava několika vzájemně spojených jednoduchých zámků.“[1]

„Řídicí články jističů mohou být začleněny jako spouště nebo jako relé. Spoušť je součástí jističe, neboť působí mechanicky přímo na zámek nebo volnoběžku. Proto musí mít co nejmenší

rozměry, což však má za následek, že vyvolává poměrně malou vybavovací sílu. Zámky a volnoběžky musí být proto konstruovány tak, aby i tato malá síla stačila k uvolnění vypínacího mechanismu. Pojmem relé označujeme tytéž řídicí články, jestliže působí nepřímo, nejčastěji prostřednictvím pomocného elektrického obvodu. V tomto případě mohou být umístěny v rozvaděči samostatně mimo prostor jističe.“ [1]

## 2 Rozdělení jističů dle velikosti přenášeného proudu

Vzduchové jističe nízkého napětí se v dnešní době vyrábí od proudů jednotek ampér do proudu několika tisíců ampér.

Lze je dle přenášeného proudu rozčlenit na jističe:

1. Malé (do 63 A)
2. Střední (100 – 630 A)
3. Velké (1000 A a více)

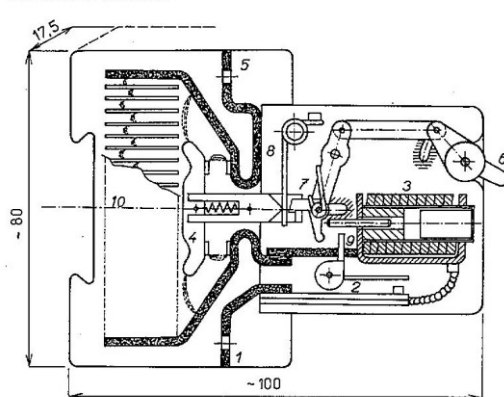
### 2.1 Malé jističe

„Evropští výrobci je nyní dodávají v jednotné šířce 17,5 mm na pól. Používá se buď jednoduchá, nebo můstková kontaktní soustava, tj. buď s jedním, nebo dvojím přerušením proudové dráhy. Materiálem kontaktu bývá převážně slitina stříbra s omezeným množstvím teplotně odolné složky, jako je CdO, C, Ni nebo W. Kontakty zejména v můstkovém provedení mají malou hmotnost, takže dovolují velkou vypínací rychlost. Dosažení velké vypínací rychlosti podporuje vystřelovací cívka. Je to upravená zkratová spoušť, která nejen vybavuje volnoběžku jističe, ale také následkem přímého mechanického spřažení s pohyblivým kontaktem urychluje jeho oddálení od pevného kontaktu. Podmínkou je tak rychlá činnost, aby oblouk zapálil v době kratší než 5 ms od vzniku zkratu. Je-li takto vybavený jistič doplněn zhašecí komorou, jejíž počet  $n$  ocelových roštových prepážek je při fázovém napětí  $U$ , dán vztahem  $n \geq 0,05 U$  (na dílčí oblouček tedy připadá napětí nejméně 20 V), může vykazovat omezovací účinek. To znamená, že proud obvodu následkem rychle narůstajícího odporu

oblouku na velkou hodnotu nejen nedosáhne své plné amplitudy, ale velmi rychle se pak zmenšuje až na nulu. Tímto opatřením se vypínací výkon jističe značně zvětší.“[1]

„Nebo z opačného pohledu: takto lze miniaturizovat jistič z hlediska vypínacího proudu. Zpravidla se maximální propuštěná špička při vlastních dobách (tj. dobách do zapálení oblouku) kolem 2 ms pohybuje kolem 30 % amplitudy vypínaného proudu. Tak lze zvětšit jmenovitý vypínací proud malého jističe z dosavadních 3 kA až na hodnotu 10 kA.“ [1]

„Příklad provedení moderního jističe je na obr. 1. Proudovou dráhu tvoří svorka 1, dvojkov nadproudové spouště 2, vinutí zkratové spouště 3, můstkový kontakt 4 a svorka 5. Vybaví-li nadproudová spoušť nebo zkratová spoušť nebo obsluha ruční pákou 6 (přes jednotlivé elementy volnoběžky) západku 7, převede rameno zkrutné pružiny 8 kontaktní můstek 4 do vypnuté polohy. Při zkratu urychluje pohyb můstku nárazník 9 jádra elektromagnetické spouště 3. Elektrodynamické síly vyvolané proudovou smyčkou v součinnosti s ocelovými deskami roštu 10 zavedou oba vytvořené oblouky do zhášecí komory, kde se na deskách roštu rozčlení na n obloučků v sérii. Rychle narůstající odpor série obloučků omezí nárůst zkratového proudu a zmenší jej až na hodnotu, při níž následkem labilizace (tj. stavu, kdy rekombinační pochody převládnu nad pochody ionizačními) oblou samovolně zanikne.“[1]



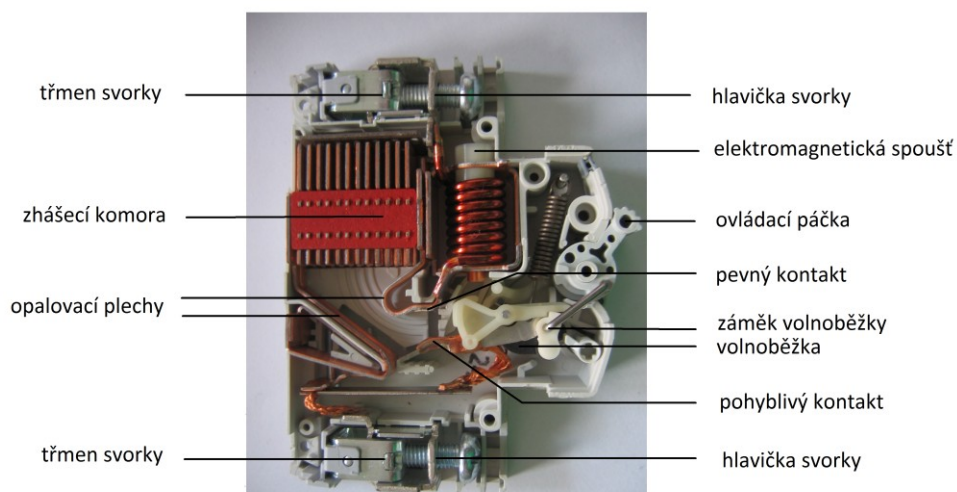
Obr. 1- Řez malým jističem [1]

„Novodobé konstrukce jističů všech velikostí mívají zhášecí cívky jen u provedení na stejnosměrný proud. K vybuzení dostatečného vyfukovacího magnetického pole u střídavých jističů stačí ve spojení s ocelovou roštovou komorou vlastní smyčka proudové dráhy, jako jednopólové se staví jen jističe malé (instalační), jinak se jističe (včetně malých) stavějí jako vícepólové, převážně trojpólové celky. U vícepólového provedení je volnoběžka společná pro

celou soustavu. U malých jističů bývají nadproudové spouště, zpožděná i zkratová, pevně nastaveny na určitou hodnotu; podpěťová spoušť se používá jen výjimečně. Ovládání jističů je jen ruční. U středních a velkých jističů se používají spouště nastavitelné v určitém proudovém rozmezí a montují se buď do všech tří, nebo jen do dvou fází; podpěťová spoušť je častější. Jističe lze doplnit zapínacím pohonem elektromagnetickým, střádačovým nebo tlakovzdušným a používat je pro dálkové ovládání. V takových případech bývají zároveň vybaveny pomocnou kontaktní soustavou pro signalizaci stavu do velínu, pro nastavení pomocných a ovládacích obvodů celého zařízení do souhlasu s polohou kontaktů jističe a také pro blokování. Proto je ovládání pomocného spínače odvozeno přímo mechanicky od pohyblivého ústrojí jističe.“[1]

„Kontakty středních a velkých jističů jsou zpravidla palcové s čelním stykem. Kontaktním materiálem je buď měď (kontakt má pak smykový dosed), nebo stříbro ztužené odolnou složkou. Větší přístroje mívají dvojdielnou kontaktní soustavu, hlavní a opalovací. Hlavní kontakty, převážně ze stříbra, jsou dimenzovány na trvalý přenos jmenovitého proudu a krátkodobé zatížení zkratovým proudem. Opalovací kontakty musí odolávat účinkům oblouku při provozním i zkratovém vypínání i zapínání. Při zapínání do zkratu nesmí dojít k jejich svaření. Kontakty jsou upraveny tak, aby byly snadno výměnné. Vyrábějí se z materiálů spékaných na bázi mědi či stříbra. Jsou teplotně ztuženy odolnými složkami.“ [1]

### 3 Konstrukční členění



Obr. 2 - Konstrukce jističe nn

### 3.1 Základní díly jističe

Jistič můžeme obecně rozčlenit na několik základních konstrukčních dílů, a to na:

1. Části proudovodné
2. Izolaci přístroje
3. Mechanismus
4. Zhášedla
5. Výzbroj (ověšení)

První tři díly jsou nutnou součástí každého přístroje. Se zhášedly a výzbrojí se setkáváme jen u přístrojů některých typů a provedení.

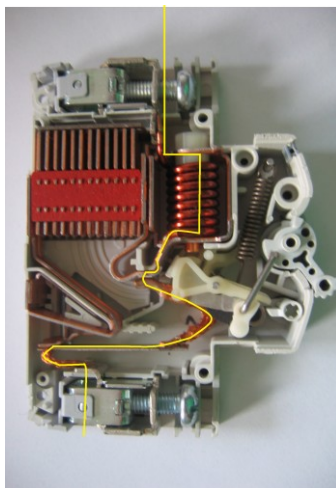
V Evropě je vymyšlen nový mezinárodní systém zásuvek a vidlic podle IEC 60906-1, se zavedením v České republice ani v žádném jiném státě se prozatím nepočítá, jelikož by to vyžadovalo nemalé až astronomické náklady. [2]

### 3.2 Proudovodné části

Proudovodná dráha je tvořena všemi částmi přístroje, kterými je realizován přenos proudu. Většinou je tvořena přípojevacími svorkami, spojovací částí a kontakty. V době, kdy těmito částmi protéká elektrický proud, jsou namáhány dvojím způsobem a to jak tepelně tak i mechanicky.[2]

Tepelné namáhání je tvořeno jednak tepelným namáháním trvalého způsobu, které je tvořeno procházejícím provozním proudem, a dále pak zvětšené, způsobeno krátkodobými zkratovými proudy.[2]

Dále je možno zahrnout do tepelného namáhání i opalování kontaktů. Je to zvláštní druh tepelného namáhání, při kterém dochází k vypařování a odstřikování roztaveného materiálu kontaktů vlivem vysoké teploty oblouku.[2]



Obr. 3 - Proudovodná dráha jističe nn

K mechanickému namáhání dochází jednak při provozním spínání, tj. tahem pružin, rozběhem a brzděním setrvačných hmotností pohybujících se částí, nárazy kontaktů při spínání a elektrodynamickými silami vzájemně působící mezi proudovodnými částmi při zkratech. [2]

### 3.3 Izolace přístroje

Izolační materiály při stavbě elektrických přístrojů hrají velice důležitou roli a to z důvodu, že zajišťují upevnění proudovodných částí s dostatečnou mechanickou pevností elektrických izolovaně od země a od vodičů jiných fází. Ve vypnutém stavu pak dále slouží k zajištění vzájemné elektrické izolace obou kontaktů. Konstrukčně musí být jednotlivé díly navrženy tak, aby izolační vzdálenosti mezi částmi s různým potenciálem byly dostatečné a rozložení elektrického pole bylo co nejpříznivější. Při stavbě jističů využíváme izolační materiály všech tří skupenství: plyny (zvláště vzduch), kapaliny (zvláště transformátorový olej), pevné látky (organické i anorganické).[2]

Základním izolačním materiálem je vždy pevná látka, která mechanicky spojuje a elektricky odděluje vodivé části. Jelikož u přístrojů musí docházet ke spínacímu procesu (oddalování a přibližování kontaktů), je nutné využít dalšího druhu izolantu a to buď plynného, nebo kapalného, ve kterém se tento proces bude vykonávat. Rozhraní mezi nimi tvoří povrch pevného izolantu. Tento povrch bývá často nejslabším místem izolace, neboť se na něm hromadí nečistota nebo sráží vlhkost, což má nepříznivý účinek na elektrickou pevnost. [2]



### 3.4 Mechanismus

Mechanismem lze nazvat zařízení, kterým přemísťujeme kontakty z jedné polohy do druhé. K mechanismu vypínače patří také nosný rám či jiný mechanický útvar, který tvoří základní člen, na němž jsou upevněny jednotlivé spínací póly. U drobných spínačů mn a nn bývá izolační, u větších typů nn a u přístrojů vn, vvn a zvn výlučně kovový. Základní rám rozměrných a robustních vypínačů je pak vždy vytvořen jako pojezdový. [2]

### 3.5 Zhášedla

Každý jistič je schopen vypnout při daném napětí jen proud určité velikosti. Krajiní proud, který ještě spolehlivě vypne, určuje jeho vypínací schopnost. Nazýváme jej jmenovitý vypínací proud jističe. Jistič musí spolehlivě vypínat proudy všech velikostí, od nejmenšího možného až do jmenovitého vypínacího proudu (vyznačeného na štítku vypínače). [2]

Vypínací schopnost prosté kontaktní soustavy v normálním ovzduší je poměrně malá, jen několik desítek nebo stovek ampérů, podle velikosti napětí. Určitého zvětšení dosáhneme, zaměníme-li vzduch za jiné prostředí, jako je např. olej nebo některý plyn.[2]

Většinou vypínacího proudu za současného podstatného zkrácení doby hoření oblouku dosáhneme jen pomocí zhášedel. Zhášedlo je zařízení, které vhodným způsobem působí na oblouk tak, aby i při velkých proudech (řadu desítek kiloampérů) uhasnul během nejlépe jedné, nejvýše však jen několika málo setin sekundy. Zhášedla pracují podle různých principů. Konečným účelem každého z nich je intenzivní deionizace dráhy oblouku. [2]

Provedení jističe má podle použitého principu zhášedla určité charakteristické rysy. Jističe stejných parametrů, avšak s různými principy zhášedel, se liší od sebe více než jističe rozdílných parametrů (zejména napětí), ale se zhášedlem stejné soustavy. [2]

### 3.6 Výzbroj

Vlastní jistič lze v řadě případů pro rozšíření jeho činnosti doplnit různými přídavnými přístroji a zařízeními. Netýká se to prostých přístrojů nn, které ovládáme ručně, ale spíše dálkově ovládaných stykačů a jističů a především spínačů nad 1 000 V. U některých případů je určité zařízení neoddělitelnou součástí spínače, v jiných je totéž zařízení považováno za ověšení. Pokud spínací přístroj vykonává svou funkci i bez tohoto zařízení můžeme ho nazvat ověšením. Mezi něj lze zařadit:

1. Pomocné signální kontakty
2. Dálkové elektromagnetické spouště
3. Spouště podnapěťové nebo přímé nadproudové
4. Dálkové pohony strojní nebo pákové
5. Podvozek s pohyblivým příslušenstvím
6. Různé druhy krytů

[2]

## 4 Řešení silových účinků elektrického proudu

### 4.1 Silové účinky mezi několika proudovými drahami

Při řešení tohoto případu si nejdříve nahradíme proudové dráhy proudovými vlákny. Nejčastěji vyskytujícím se případem v přístrojích je případ dvou rovnoběžných vodičů. Síla  $F_2$ , která působí na element  $dl_2$  s proudem  $i_2$  vlivem proudu  $i_1$  procházejícím celým vodičem  $l_1$ , je určena rovnicí:

$$d\vec{F}_2 = i_2 \left[ d\vec{l}_2 \times \vec{B}_1 \right] \quad \{3.1\}$$

Kde  $B_1$  je vektor indukce vyvolané proudem  $i_1$  ve vodiči délky  $l_1$ . Pro případ nekonečně dlouhého vodiče plyne pro  $B_1$  ze zákona Biotova - Savartova:

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 i_1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\vec{l}_1 \times \vec{r}}{r^3} \quad \{3.2\}$$

U rovnoběžných vodičů bude vektor  $B_1$  stále kolmý k rovině proložené oběma vodiči a jeho velikost bude:

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 i_1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \beta}{r^2} dl_1 \quad \{3.3\}$$

Po dosazení rovnice {3.3} do rovnice {3.1} získáme vztah {3.4} pro velikost síly  $F_2$  působící na délku  $l_2$  vztah {3.4}. [1,3]

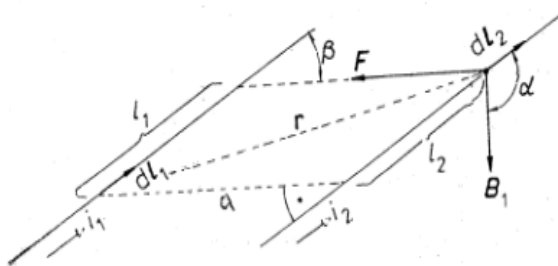
$$F_2 = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi} \int_0^{l_2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \beta \sin \alpha}{r^2} dl_1 dl_2 \quad \{3.4\}$$

Pro řešení integrálu {3.4} použijeme níže uvedené vztahy (viz. obr. 4)

$$l_1 = a \cot g \beta \quad \{3.5\}$$

$$dl_1 = -\frac{a}{\sin^2 \beta} d\beta \quad \{3.6\}$$

$$r = \frac{a}{\sin \beta} \quad \{3.7\}$$



Obr. 4 - Síla působící mezi dvěma proudovými vlákny [1]

Dosazením rovnice {3.7} a {3.6} do rovnice {3.4} získáme vztah:

$$F_2 = -\frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi} \int_0^{l_2} \int_0^{\pi} \frac{\sin \beta \sin \alpha}{a} d\beta dl_2 \quad \{3.8\}$$

Pro případ, kdy jsou vodiče rovnoběžné tj. ( $\alpha=90^\circ$ ), dostaneme po vyřešení integrálu:

$$F_2 = -\frac{\mu_0 i_1 i_2 l_2}{4\pi a} [\cos \beta]_{\pi}^0 = \frac{\mu_0 i_1 i_2 l_2}{2\pi a} \quad \{3.9\}$$

Pro dva nekonečně dlouhé vodiče platí obecně vztah:

$$F = \frac{2l}{a} i_1 i_2 \cdot 10^{-7} \quad \{3.10\}$$

Je třeba poznamenat, že v elektrických přístrojích se často vyskytuje případ, že proudovodné dráhy nejsou přímé. V takovém případě se musí postupovat tak, že proudovou dráhu rozdělíme na přímé úseky konečné délky, mezi nimiž sílu počítáme.[1,3]

Pokud tedy došlo k rozdělení na vodiče konečné délky, změní se integrační meze ve vztahu pro výpočet magnetické indukce {3.3}. Indukce magnetického pole  $B_{2x}$  v libovolném místě  $x$  od proudovodného vlákna s proudem  $i_2$  je dána vztahem:

$$B_{2x} = \frac{\mu_0 i_1}{4\pi a} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad \{3.11\}$$

Přičemž velikost  $\beta_1$  a  $\beta_2$  je dána vztahy:

$$\cos \beta_1 = \frac{-x}{\sqrt{a^2 + x^2}} \quad \{3.12\}$$

$$\cos \beta_2 = \frac{l_1 - x}{\sqrt{a^2 + (l_1 - x)^2}} \quad \{3.13\}$$

Po dosazení vztahů {3.12}, {3.13} a {3.11} do rovnice {3.1} dostaneme:

$$F_2 = -\frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi} \int_0^{l_2} \left[ \frac{-x}{\sqrt{a^2 + x^2}} + \frac{l_1 - x}{\sqrt{a^2 + (l_1 - x)^2}} \right] dx \quad \{3.14\}$$

Výsledná síla působící na vodič konečné délky:

$$F_2 = -\frac{2i_1 i_2 l_2}{a} \left[ \sqrt{\left(\frac{a}{l_1}\right)^2 + 1} - \frac{a}{l_1} \right] \cdot 10^{-7} \quad \{3.15\}$$

Porovnáme-li vztah {3.9} se vztahem {3.15}, lze vidět, že se vztahy liší o člen v závorce, který nám vyjadřuje, jak se změnila velikost síly vodičů omezené délky oproti síle mezi dvěma nekonečně dlouhými vodiči na délku  $l$ . Tento opravný člen se označuje  $k_d$  a nazývá se činitel uspořádání vodičů konečné délky.[1,3]

Musíme si uvědomit, že jsme doposavad řešili případy, kdy jsme mohli nahradit proudovou dráhu proudovým vláknem. Pokud nyní budeme uvažovat dva rovnoběžné vodiče s pravoúhlým průřezem, musíme zavést tzv. opravný činitel, kterým je nutno násobit sílu vypočítanou dle rovnice {3.10}. Tento činitel nazýváme činitelem tvaru průřezu.

$$F = \frac{2l}{a} i_1 i_2 k_p k_d \cdot 10^{-7} \quad \{3.16\}$$

[1,3]

## 4.2 Silové účinky při zakřivení proudové dráhy

Zakřivená proudová dráha s proudem vytváří magnetické pole, které je příčinou elektrodynamických sil působících na ni samu. Pro zjednodušení výpočtu, musíme opět rozdělit proudovou dráhu na přímé úseky konečné délky a mezi nimi potom počítáme vzájemné síly. Proudovodné dráhy máme dvojího typu a to buď s jednoduchým záhybem, nebo dvojitým pravoúhlým záhybem.[1,3]

U výpočtů sil s pravoúhlým zakřivením vyjdeme ze vztahu {3.1} a vztahu pro magnetickou indukci  $B$  v libovolném bodě {3.11}. Indukce v libovolném místě ve vzdálenosti  $x$  od ramene délky  $h$  tedy bude:

$$B_x = -\frac{\mu_0 i}{4\pi x} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad \{3.17\}$$

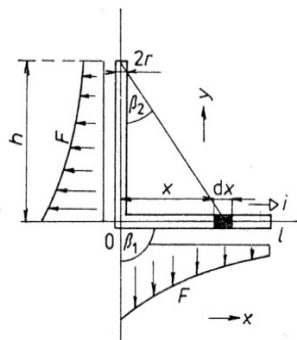
Jestliže dosadíme do rovnice {3.1}, dostaneme následující vztah pro velikost síly:

$$F = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \int_r^l (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \frac{dx}{x} \quad \{3.18\}$$

Pro úhly  $\beta_1$  a  $\beta_2$  můžeme psát:

$$\cos \beta_1 = 0 \quad \{3.19\}$$

$$\cos \beta_2 = \frac{h}{\sqrt{h^2 + x^2}} \quad \{3.20\}$$



Obr. 5 - Průběh síly působící na pravoúhlý záhyb [1]

Po dosazení výrazů {3.19} a {3.20} do rovnice {3.18} dostaneme pro sílu F:

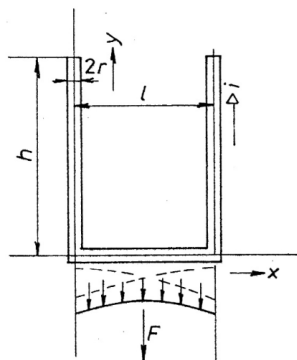
$$F = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \int_0^l \frac{dx}{x \sqrt{h^2 + x^2}} \quad \{3.21\}$$

Pro jednoduchý pravoúhlý záhyb po vyřešení integrálu rovnice {3.21} a dosazení integračních mezí je síla působící na rameno l:

$$F = i^2 \ln \frac{l(h + \sqrt{h^2 + r^2})}{r(h + \sqrt{h^2 + l^2})} \cdot 10^{-7} \quad \{3.22\}$$

U spínacích přístrojů nízkého napětí se velmi často vyskytuje proudovodná dráha s dvojitým pravoúhlým záhybem. V tomto případě je celková síla působící na spodní délky l tvořena dvěma svislými úseky délky h. Průběh výsledné síly po délce l bude tvořen superpozicí dvou průběhů viz. Obr. 6. Musí ovšem platit podmínka že  $l \gg 2r$ . Poté můžeme určit velikost síly vzorcem:

$$F = 2i^2 \ln \frac{l(h + \sqrt{h^2 + r^2})}{r(h + \sqrt{h^2 + l^2})} \cdot 10^{-7} \quad \{3.23\}$$



Obr. 6 - Průběh síly působící na spodní úsek dvojitého pravoúhlého záhybu [1]

[1,3]

### 4.3 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY VYVOLANÉ ZMĚNOU INDUKČNOSTI OBVODU

„Dochází-li při činnosti elektrického přístroje ke změně energie magnetického pole obvodu, pak tato změna vyvolá sílu, jejíž velikost stanoví vztah :

$$F = \frac{\partial W_m}{\partial x} \quad \{3.24\}$$

kde  $W_m$  je energie magnetického pole obvodu a  $x$  souřadnice ve směru, v němž síla působí. Energie nahromaděnou v elektrickém poli vyjadřuje rovnice:

$$W = \frac{1}{2} Li^2 \quad \{3.25\}$$

V rovnici vyjadřuje  $L$  indukčnost obvodu,  $i$  proud obvodu. Dosadíme-li rovnici {3.25} do rovnice {3.24} a budeme-li předpokládat, že proud  $I$  se nebude měnit v závislosti na souřadnici  $x$ , potom pro sílu  $F$  dostaneme:

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial x} \quad \{3.26\}$$

Abychom mohli sílu  $F$  vypočítat, museli bychom řešit magnetické pole obvodu. Mnohem rychleji dospějeme k cíli, zjistíme-li závislost  $L=f(x)$  měřením.

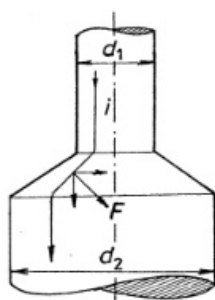
V praxi se dochází nejčastěji ke změně energie magnetického pole při vypínání během oddalování kontaktů. Pokud mezi kontakty hoří oblouk, jde o jednoduché zvětšování geometrických rozměrů obvodu, jehož následkem je i změna indukčnosti.“ [1]

#### 4.4 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY VYVOLANÉ ZMĚNOU PRŮŘEZU VODIČE

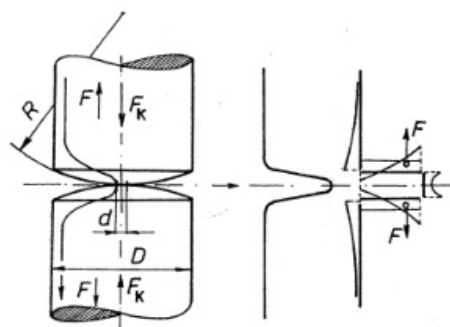
Při změně průřezu vodiče, která může nastat např., pokud je ve vodiči otvor pro připojení k tělesu přístroje, nebo možnost připojení dalších částí proudové dráhy vzniká deformace proudového pole a tím mohou vznikat elektrodynamické síly. Platí, že jakákoliv změna průřezu je příčinou vzniku sil.

Při souměrné změně kruhového průřezu podle obr. 8 udává velikost působící síly vztah:

$$F = i^2 \ln \frac{d_2}{d_1} \cdot 10^{-7} \quad \{3.27\}$$



Obr. 7 - Síla vznikající při změně průřezu proudové dráhy [1]

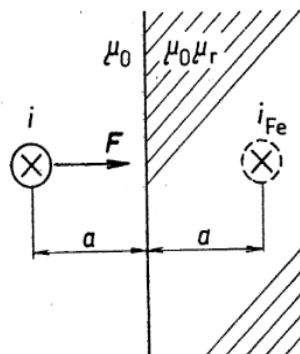


Obr. 8 - Odpudivá síla mezi kontakty [1]

[1,4]



## 4.5 ELEKRODYNAMICKÉ SÍLY PROUDOVÉ DRÁHY V BLÍZKOSTI FEROMAGNETICKÉHO ROZHRANÍ



Obr. 9 - Přitažlivá síla mezi proudovodičem a feromagnetikem [1]

Nejtypičtějším případem v konstrukci elektrických spínacích přístrojů nn, kde se s touto problematikou setkáváme, je zhášení elektrického oblouku. Ke zhášení oblouku se používá u jističů nn kovové roštové komory, která je tvořena tvarovanými ocelovými plechy. Ty nám v tomto případě představují feromagnetický materiál a samotný oblouk zde reprezentuje proudovodič.[4]

K určení velikosti působící síly na proudovodič využijeme zrcadlového obrazu vodiče, jímž souhlasným smyslem prochází proud velikosti:

$$i_{Fe} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} i \quad \{3.28\}$$

Za tohoto předpokladu můžeme tuto problematiku řešit a posuzovat jako při řešení dvou rovnoběžných, nekonečně dlouhých vodičů. Výsledný vztah pro nekonečně dlouhý vodič je:

$$F = \frac{2l}{2a} i i_{Fe} \cdot 10^{-7} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} \frac{l}{a} i^2 \cdot 10^{-7} \quad \{3.29\}$$

U reálných výpočtů silových účinků reálné roštové komory určujeme velikost síly vtahující oblouk do nitra komory jako změnu energie nahromaděné v magnetickém poli oblouku. Tuto velikost určuje rovnice {3.26}.

[1,4]

## 5 TEPELNÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU

### 5.1 OTEPLOVÁNÍ PROUDOVODIČE

Dojde-li k průtoku elektrického proudu  $I$  (A) dlouhým vodičem s odporem  $R$  ( $\Omega$ ), pak v každém časovém okamžiku  $dt$  v něm vznikají tepelné ztráty  $dQ = RI^2 dt$ . Zmíněné teplo se dá rozdělit na dvě části. První část se odvede ochlazováním ve stejné době do okolí. Je to množství  $\alpha_0$  ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ), které nazýváme součinitel přestupu tepla,  $A$  ( $\text{m}^2$ ) je ochlazovací povrch úseku,  $\Delta\vartheta$  (K) je okamžité oteplení tělesa proti okolí. [1]

Druhá část tepla v tělese zůstává a zvyšuje jeho teplotu o  $d\vartheta$ . Teplo k tomu spotřebované určuje vztah  $cV d\vartheta$ . Přičemž  $c$  ( $\text{J/m}^3 \cdot \text{K}$ ) je objemová tepelná kapacita uvažovaného úseku vodiče s objemem  $V$  ( $\text{m}^3$ ). [1]

Platí tedy vztah:

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Delta\vartheta dt + cV d\vartheta \quad \{4.1\}$$

Rovnice se vyřeší pomocí separací proměnných a výsledné řešení je po úpravě:

$$t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \left( 1 - \frac{\alpha_0 A}{RI^2} \Delta\vartheta \right) \quad \{4.2\}$$

Vztah antilogaritmujeme a vyjádříme explicitně okamžité oteplení:

$$\Delta\vartheta = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} [1 - \exp(-\alpha_0 A t / cV)] = \Delta\vartheta_\infty [1 - \exp(-t / \tau)] \quad \{4.3\}$$

Přitom platí:

$$\Delta\vartheta_\infty = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} \quad \{4.4\}$$

$$\tau = \frac{cV}{\alpha_0 A} \quad \{4.5\}$$

Křivka časového průběhu oteplení má exponenciální charakter. Z počáteční nulové hodnoty narůstá stále pomaleji, až za dobu  $t \rightarrow \infty$  se ustálí na hodnotě maximálního oteplení  $\Delta\vartheta_{\infty}$ . [1]

Časovou konstantu ( $\tau$ ) lze definovat jako dobu, za kterou by těleso dosáhlo ustáleného oteplení  $\Delta\vartheta_{\infty}$ , kdyby se všechno uvolněné teplo spotřebovalo jen na zvyšování jeho teploty, tj. kdyby bylo  $\alpha_0 = 0$ . [1]

Prochází-li stále stejný proud vodičem po velmi dlouhou dobu, těleso dosáhne teplotně ustáleného stavu. Při ustáleném stavu platí že:

$$\frac{\Delta\vartheta}{dt} = 0 \quad \{4.6\}$$

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\infty} \quad \{4.7\}$$

Po dosažení těchto vztahů do rovnice {4.1} dostaneme rovnici:

$$RI^2 = \alpha_0 A \Delta\vartheta_{\infty} \quad \{4.8\}$$

Tedy tvaru stejného jako je vztah {4.4}.

[1]

## 5.2 ODPOR VODIČE

Pro určování tepelných ztrát ve vodiči je nutné znát odpor vodiče  $R$ . Je-li proud rozložen rovnoměrně po průřezu vodiče  $S$  konstantním po délce  $l$ , platí vztah:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \{4.9\}$$

$\rho$  v rovnici značí elektrickou rezistivitu s jednotkou ( $\Omega \cdot m$ ). Tato rezistivita je materiálová vlastnost, která je závislá na teplotě. U vodičů z kovových materiálů odpor s teplotou vzrůstá. V praxi, kdy je pásmo provozních teplot vodičů poměrně úzké a jeho horní hranice nepřilíží vysoká, vystačíme s lineárním vztahem:

$$\rho = \rho_{rf} (1 + \alpha \Delta \vartheta) \quad \{4.10\}$$

V rovnici {4.10} veličina  $\alpha$  znamená teplotní součinitel odporu, jelikož udává poměrný přírůstek odporu při zvýšení teploty o 1K oproti teplotě  $\vartheta_{rf}$ . Jeho velikost pro  $\vartheta_{rf} = 0^\circ\text{C}$  a  $\vartheta_{rf} = 40^\circ\text{C}$  je uvedena v tabulkách.[1]

Uvažujeme-li případ, kdy vodičem protéká střídavý proud, dochází vlivem vlastního magnetického pole jiného velmi blízkého vodiče k nerovnoměrnému rozložení proudu po průřezu a tím pádem ke zvětšení odporu vodiče. Tento jev znázorňujeme doplněním vzorce {4.9} o činitel povrchového zhuštění proudu  $k_p$  o činitel jevu blízkosti  $k_{bl}$ . Poté bude úplný výpočet odporu proudovodiče :

$$R = \rho_{rf} (1 + \alpha \Delta \vartheta) \frac{l}{S} k_p k_{bl} \quad \{4.11\}$$

[1]

## 6 PRAKTICKÁ ČÁST

### 6.1 ZÁKLADNÍ STAVEBNÍ SMĚRNICE

Návrh a výpočet jističe musí vyhovovat normě ČSN EN 60898-1. Rozměry vycházejí z modulární řady drobných jističů, šířka předního krytu je 17,5 mm, výška 90 mm a šíře celého jističe je 64 mm. Viz příloha 1.(Rozměry 1. pólového jističe).

#### 6.1.1 Další stavební směrnice

Tab. 1 - Stavební směrnice

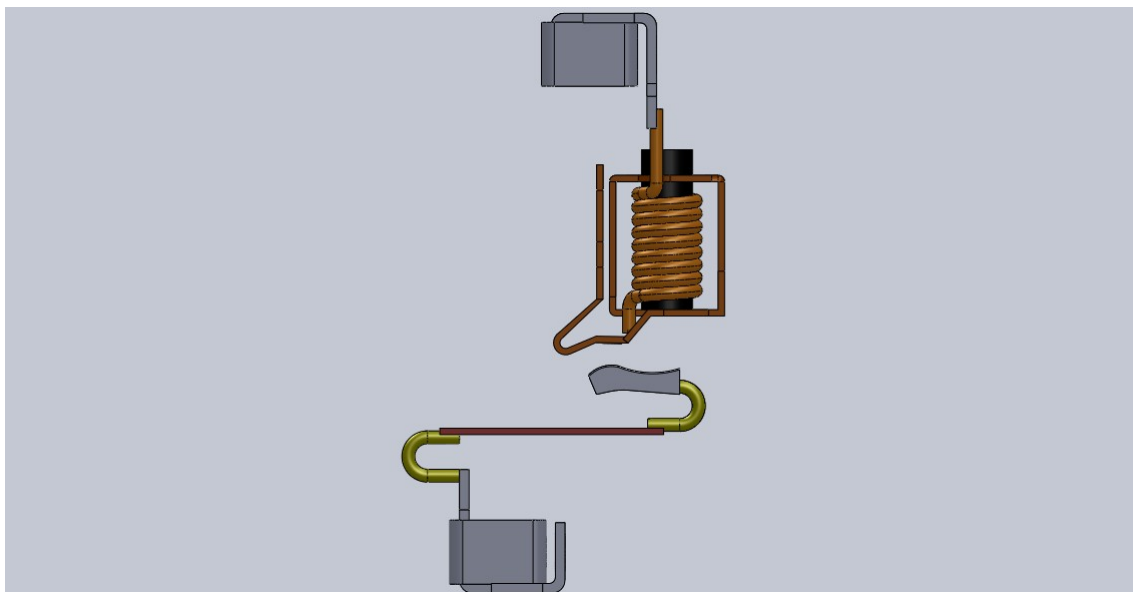
Počet pólů	1
Jmenovitý proud	10 - 25 A
Jmenovité pracovní napětí	230 / 400 V a.c.
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Jmenovitá zkratová schopnost	7070 A
Krytí	IP 20
Připojení	Vodič Cu plný 2,5 mm <sup>2</sup> až 10 mm <sup>2</sup>
Teplota okolí	+ 35°C
Pracovní poloha	Libovolná
Dovolené oteplení	20 K

## 6.2 IZOLACE

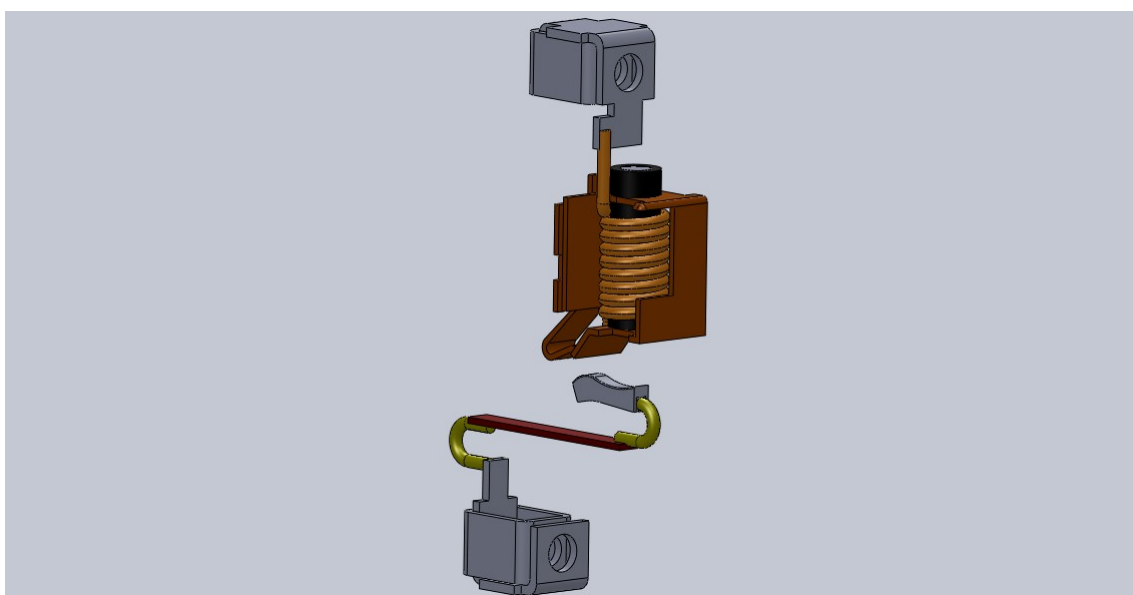
Při navrhování spínacího přístroje udává ČSN EN 60898-1 bezpečnou míru izolace, mezi živými částmi různé polarity a mezi živými částmi a kostrou. V normě se předepisují nejmenší dovolené povrchové cesty a vzdušné vzdálenosti. Tyto údaje zjistíme z tabulek v příslušné normě, na základě zařazení námi navrhovaného přístroje do kategorie dle stupně znečištění. Navrhovaný přístroj zařazujeme do kategorie 2 (tj. normálně se vyskytuje pouze nevodivé znečištění, příležitostně je možné však počítat s dočasnou vodivostí způsobenou kondenzací). Z definice vyplývají velikosti povrchových cest u ověřených izolantů, neověřených izolantů a velikosti vzdušných vzdáleností, ty musí být respektovány i po připojení vodiče s největším průřezem a v dalších specifických situacích.

## 6.3 VÝPOČET DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ ZKRATOVÉHO PROUDU

V důsledku velkých zkratových proudů, které se mohou na proudovodné dráze jističe vyskytovat, provádíme kontrolní výpočet dynamických účinků zkratového proudu. Výpočet provádíme z hlediska vzájemného působení všech částí proudovodné dráhy na kontaktní styk. Při tomto výpočtu jde o stanovení velikosti a směru výsledné síly. Síla může působit dvěma způsoby a to jednak, že přispívá nebo nepřispívá do kontaktního přitlaku. Pro výpočet síly je nutné znát tvar proudovodné dráhy. Model proudovodné dráhy byl vytvořen v softwaru SolidWorks, ve kterém byla vytvořena i technická dokumentace navrhovaného elektrického přístroje. Model dráhy, dle kterého bude výpočet prováděn je uveden níže na Obr. 10. Pro jednoznačné určení použijeme zjednodušený výpočtový model proudovodné dráhy Obr. 12.

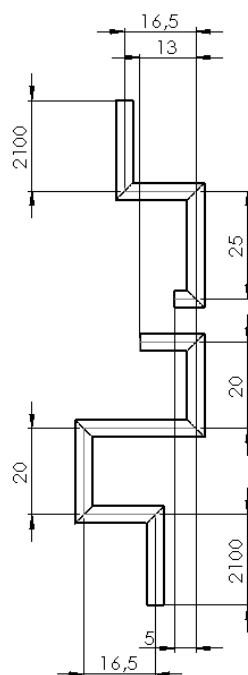


Obr. 10 - Model proudovodné dráhy



Obr. 11 - Model proudovodné dráhy 1





Obr. 12 - Výpočtový model proudovodné dráhy

Efektivní hodnota zkratového proudu, pro kterou řešíme elektrodynamické síly je  $I_{zef} = 7070 \text{ A}$ , výpočet bude proveden pro maximální hodnotu zkratového proudu.

#### Maximální zkratový proud

$$I_d = \sqrt{2} \cdot I_{zef} = \sqrt{2} \cdot 7070 = 10000 \text{ A} \quad \{5.1\}$$

### 6.3.1 Výpočet odpudivé elektrodynamické síly v kontaktní úžině

Výpočet je proveden dle kapitoly 4.4. Materiál celé proudovodné dráhy včetně kontaktů je měď, která má dle tabulky 2 – 1 na straně 27 v literatuře č. 6 tvrdost  $H = 350 \text{ MPa}$ .

#### Průměr kruhové stykové plošky

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_k}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,74}{\pi \cdot 350 \cdot 10^{-6}}} = 1,17 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad \{5.2\}$$

Průřez kontaktní částí je definován jako čtverec o rozměru  $a = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

Průměr půlkruhové hladiny proudové úžiny

$$D = \sqrt{a^2} = \sqrt{(3 \cdot 10^{-3})^2} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad \{5.3\}$$

Elektrodynamická síla v kontaktní úžině

$$F_{uz} = 10^{-7} \cdot I_D^2 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) = 10^{-7} \cdot 10000^2 \cdot \ln\left(\frac{3 \cdot 10^{-3}}{1,17 \cdot 10^{-4}}\right) = -32,44 \text{ N} \quad \{5.4\}$$

Výslednou sílu definuje znaménko mínus, nepřispívá do kontaktního styku.

### 6.3.2 Výpočet síly mezi svorkou jističe a zkratovou spouští

Z modelu znázorněné dráhy je patrné, že jde o výpočet pravoúhlého záhybu. Svorku na základě nejednoznačného určení rozložení proudnic nahrazujeme vodičem o délce  $l = 16,5 \text{ mm}$  a průměru  $d = 2 \text{ mm}$ . Přesnějšího řešení lze docílit pouze použitím softwaru např. ANSYS, WORKBENCH. Tato práce je však řešena pomocí exaktních vzorců. Další zjednodušení bylo použito u zkratové spouště a to, že byla nahrazena vodičem o délce  $l = 25 \text{ mm}$  a průměru  $d = 2 \text{ mm}$ . Výpočet probíhá dle kapitoly 4.2. Do vzorce dosazujeme hodnoty:  $l = 17,5 \text{ mm}$ ,  $a = 2 \text{ mm}$ ,  $h = 26 \text{ mm}$ .

Výpočet síly

$$F_{23} = 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot l}{a}\right) \cdot \left( \frac{h + \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}}{h + \sqrt{h^2 + l^2}} \right)$$

$$F_{23} = 10^{-7} \cdot 10000^2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 17,5}{2}\right) \cdot \left( \frac{26 + \sqrt{26^2 + \left(\frac{2}{2}\right)^2}}{26 + \sqrt{26^2 + 16,5^2}} \right) = -25,97 \text{ N} \quad \{5.5\}$$

Z důvodu procházejícího proudu oběma úseky ve stejném směru se snaží záhyb „narovnat“, síla působí proti kontaktnímu styku. Tuto situaci definuje znaménko mínus.

### 6.3.3 Výpočet síly mezi zkratovou spouští a pevným kontaktem

Použité zjednodušení, týkající se zkratové spouště bylo již definováno a platí i nadále u výpočtu elektrodynamický sil. Pevný kontakt byl namodelován jako profilový vodič o rozměrech  $a = 5$ ,  $b = 6$ ,  $c = 1$ . Do vzorce dosazujeme hodnoty:  $l = 6$  mm,  $a = 6$  mm,  $h = 25$ . Výpočet se provádí dle kapitoly 6.3.2 vzorce {5.5}.

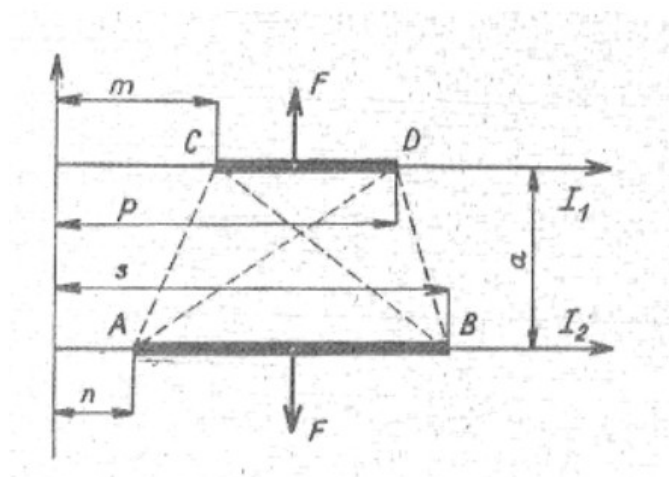
Výsledná síla

$$F_{34} = 6,86 \text{ N} \quad \{5.6\}$$

V daném případě se snaží záhyb „narovnat“. Výsledná síla působí do kontaktního styku. Situaci definuje znaménko plus.

### 6.3.4 Výpočet síly mezi svorkou a pevným kontaktem

Nyní řešíme problematiku síly mezi rovnoběžnými vodiči vzájemně posunutými o velikost zkratové spouště, které mají rozdílnou délku. Výpočet vychází z níže uvedeného Obr. 13.



Obr. 13 - Řešení vzájemně posunutých dílců rozdílné délky [6]

### Výpočet síly

$$F_{24} = 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(\frac{p-n}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{p-s}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{m-n}{a}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{m-s}{a}\right)^2 + 1} \right]$$
$$F_{24} = 10^{-7} \cdot 10000 \cdot 10000 \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left(\frac{14-0}{25}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{14-14}{25}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{2-0}{25}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{2-14}{25}\right)^2 + 1} \right]$$
$$F_{24} = 2,52 \text{ N} \quad \{5.7\}$$

Vzájemné odpuzování svorky a pevného kontaktu definuje znaménko plus.

### **6.3.5 Výpočet síly mezi pohyblivým kontaktem a lankovým vodičem k bimetalu**

Pohyblivý kontakt při řešení výpočtu elektrodynamických sil modelujeme jako kvádr, jeho mírné prohnutí, které lze vidět na modelu jističe je zanedbatelné. Lankový vodič je nadefinován jako měděný neizolovaný vodič o průměru  $d = 2 \text{ mm}$  a délky  $l = 20 \text{ mm}$ . Výpočet je proveden dle kapitoly 6.3.2 vzorce {5.5}.

### Výsledná síla

$$F_{56} = 17,85 \text{ N} \quad \{5.8\}$$

Výslednou sílu definuje znaménko plus, přispívá do kontaktního styku.

### 6.3.6 Výpočet síly mezi bimetалovou spouští a lankovým vodičem spojující pohyblivý kontakt s bimetалovou spouští

Výpočet je řešen dle kapitoly 6.3.2 vzorce {5.5}. Hodnoty pro výpočet:  $a = 1 \text{ mm}$ ,  $l = 36 \text{ mm}$ ,  $h = 20,5 \text{ mm}$ .

Výsledná síla

$$F_{67} = -28,32 \text{ N} \quad \{5.9\}$$

Výslednou sílu definuje znaménko mínus, nepřispívá do kontaktního styku.

### 6.3.7 Síla mezi bimetалovou spouští a lankovým vodičem spojující bimetалový pásek s výstupní svorkou

Až na směr působící síly je výpočet identický s předešlou kapitolou 6.3.6. Hodnoty pro výpočet:  $a = 1 \text{ mm}$ ,  $l = 36 \text{ mm}$ ,  $h = 20,5 \text{ mm}$ .

Výsledná síla

$$F_{78} = 28,32 \text{ N} \quad \{5.10\}$$

Výslednou sílu definuje znaménko plus, přispívá do kontaktního styku.

### 6.3.8 Síla mezi lankovým vodičem a výstupní svorkou

Výpočet je proveden dle kapitoly 6.3.2 {5.5}. Hodnoty pro výpočet:  $a = 2 \text{ mm}$ ,  $l = 17,5 \text{ mm}$ ,  $h = 21 \text{ mm}$ .

Výsledná síla

$$F_{89} = -24,88 \text{ N} \quad \{5.11\}$$

Výslednou sílu definuje znaménko mínus, nepřispívá do kontaktního styku.

### 6.3.9 Síla mezi pohyblivým kontaktem a bimetalovou spouští

Výpočet je proveden dle kapitoly 6.3.4 {5.7}. Hodnoty pro výpočet:  $s = 35$ ,  $p = 35$ ,  $a = 20$ ,  $n = 0$ ,  $m = 22$ .

Výsledná síla

$$F_{57} = 7,22 \text{ N} \quad \{5.12\}$$

Výslednou sílu definuje znaménko plus, přispívá do kontaktního styku.

### 6.3.10 Síla mezi bimetalovou spouští a výstupní svorkou jističe

Výpočet je proveden dle kapitoly 6.3.4 {5.7} Hodnoty pro výpočet:  $s = 35$ ,  $p = 35$ ,  $a = 20$ ,  $n = 0$ ,  $m = 21$ .

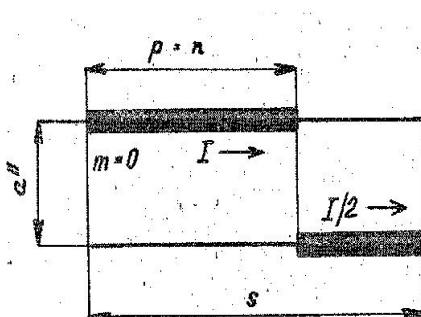
Výsledná síla

$$F_{79} = 7,86 \text{ N} \quad \{5.13\}$$

Výslednou sílu definuje znaménko plus, přispívá do kontaktního styku.

### 6.3.11 Síla mezi pohyblivým kontaktem a výstupní svorkou jističe

V této kapitole je elektrodynamická síla rovnoběžných vodičů řešena dle Obr. 14. Hodnoty pro výpočet:  $s = 27$ ,  $p = 13$ ,  $a = 41$ ,  $n = 13$ .



Obr. 14 - Řešení elektrodynamických sil na posunutých částech proudovodné dráhy [6]

### Výpočet síly

$$F_{59} = 10^{-7} \cdot \left( \frac{I_d}{2} \right) \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( \frac{s-p}{a''} \right)^2 + 1} - \sqrt{\left( \frac{-n}{a''} \right)^2 + 1} + \sqrt{\left( \frac{s}{a''} \right)^2 + 1} \right]$$

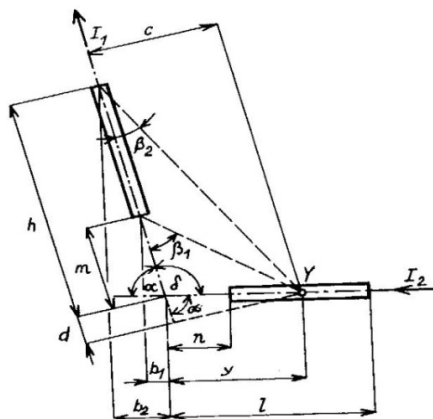
$$F_{59} = 10^{-7} \cdot \left( \frac{10000}{2} \right) \cdot \left[ 1 - \sqrt{\left( \frac{27-13}{41} \right)^2 + 1} - \sqrt{\left( \frac{-13}{41} \right)^2 + 1} + \sqrt{\left( \frac{27}{41} \right)^2 + 1} \right]$$

$$F_{59} = -0,46 \text{ N} \quad \{5.14\}$$

Výslednou sílu definuje znaménko mínus, nepřispívá do kontaktního styku.

### **6.3.12 Síla mezi pohyblivým kontaktem a spojem mezi bimetálovou spouští a výstupní svorkou**

Nyní je řešena problematika výpočtu síly dvou vodičů v úhlu, v tomto případě je úhel  $\alpha = 90^\circ$ . Výpočet je proveden dle Obr. 15. Hodnoty pro výpočet:  $l = 36$ ,  $m = 23$ ,  $n = 24$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $C = 29,5$ ,  $a = 4$ .



Obr. 15 - Řešení problematiky elektrodynamických sil mezi vodiči v úhlu [5]

### Výpočet parametrů

$$\begin{aligned}s &= \sqrt{m^2 + l^2 + 2 \cdot l \cdot m \cdot \cos \alpha} + l \cdot \cos \alpha + m \\s &= \sqrt{23^2 + 36^2 + 2 \cdot 36 \cdot 23 \cdot \cos 90^\circ} + 36 \cdot \cos 90^\circ + 23 \\s &= 65,72\end{aligned}\tag{5.15}$$

$$\begin{aligned}t &= \sqrt{m^2 + n^2 + 2 \cdot m \cdot n \cdot \cos \alpha} + n \\t &= \sqrt{23^2 + 24^2 + 2 \cdot 23 \cdot 24 \cdot \cos 90^\circ} + 24 \\t &= 57,24\end{aligned}\tag{5.16}$$

### Výpočet síly

$$\begin{aligned}F_{s2} &= 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \ln \frac{C \cdot s}{a \cdot t} \\F_{s2} &= 10^{-7} \cdot 10000 \cdot 10000 \cdot \ln \frac{29,5 \cdot 243,62}{4 \cdot 57,24} \\F_{s2} &= -21,36 \text{ N}\end{aligned}\tag{5.17}$$

Výslednou sílu definuje znaménko mínus, nepřispívá do kontaktního styku.

### **6.3.13 Výpočet stykového odporu a tlaku**

Při řešení stykového odporu bylo zvoleno napětí měknutí a napětí svaření mědi dle literatury č. 6 na straně 35 tabulky 2 – 10. Materiálová konstanta  $k$  je zvolena z tabulky 2 - 9 na straně 33 literatury č.6.

#### Bezpečná provozní velikost stykového odporu $R_s$

$$R_s \leq \frac{U_m}{2 \cdot I_m} = \frac{0,1}{2 \cdot 25} = 1 \cdot 10^{-3} \Omega\tag{5.18}$$

#### Stykový odpor na mezi svaření $R_{s2}$

$$R_{s2} \leq \frac{U_{sv}}{2 \cdot I_m} = \frac{0,3}{1,4 \cdot 10^4} = 2,14 \cdot 10^{-5} \Omega\tag{5.19}$$



Minimální přitlačnou sílu  $F_k$  určí menší z obou hodnot stykového odporu

$$F_k = \sqrt{\frac{k}{R_s}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-4}}{2,14 \cdot 10^{-5}}} = 3,74 \text{ N} \quad \{5.20\}$$

### 6.3.14 Výpočet síly pro návrh mechanismu

Velikost elektrodynamické síly působící na kontaktní přitlak vypočteme součtem všech doposud získaných sil, které dosadíme dle znamének určujících jejich směr.

$$\begin{aligned} F_{mech} &= F_k + \sum F_{xx} \\ F_{mech} &= F_k + (F_{\text{přispívající}} - F_{\text{nepřispívající}}) \\ F_{mech} &= 3,74 + [(F_{34} + F_{56} + F_{78} + F_{24} + F_{57} + F_{79}) - (F_{uz} + F_{23} + F_{67} + F_{89} + F_{59} + F_{58})] \\ F_{mech} &= 3,74 + \left[ \begin{array}{l} (6,86 + 17,85 + 28,32 + 2,52 + 7,22 + 7,86) \\ -(32,44 + 25,97 + 28,32 + 24,88 + 0,46 + 21,36) \end{array} \right] \\ F_{mech} &= 3,74 + [70,63 - 133,7] \\ F_{mech} &= -59,33 \text{ N} \end{aligned} \quad \{5.21\}$$

Výsledná hodnota má znaménko mínus. Z čehož vyplývá, že síla bude působit proti směru kontaktního přitlaku.

## 6.4 Oteplení jmenovitým proudem

Na začátku řešení problematiky oteplení jmenovitým proudem je nutné si definovat teplotu okolí, vycházíme z normy ČSN EN 60898-1 (Elektrická příslušenství – Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalací – část 1: Jističe pro střídavý provoz (AC)). Námi navrhovaný jistič realizujeme dle normy jež určuje tyto standardní podmínky: Teplota okolního vzduchu nesmí překročit  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a průměr teploty za 24 hodin nesmí překročit  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Spodní mez teploty je stanovena na  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nadmořská výška nepřekročí 2000 m.

Dále norma stanovuje maximální oteplení vypínače, jeho překročení může způsobit selhání jističe. Hodnoty oteplení jsou pro konstrukci elektrického přístroje závazné. Teplota kontaktů není definována normou, avšak jistič musí vydržet 28 denní zkoušku.

Z předešlých odstavců si stanovíme parametry pro výpočet oteplení. Veškeré teplo, které se uvnitř jističe vytvoří, budeme odvádět pouze přední stranou krytu o velikosti 17,5 mm.

Velikost dovoleného oteplení:  $\Theta = 20\text{ K}$

Teplota okolního prostředí:  $T_0 = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$

Chladicí obvod polyamidového krytu:  $O_V = 17,5\text{ mm}$

### 6.4.1 Elektrický odpor proudovodné dráhy

Při výpočtu vycházíme z měrného odporu mědi, která byla zvolena jako výrobní materiál celé proudovodné dráhy.

Měrný odpor mědi pro 35°C

$$\rho_{Cu} = \rho_{35} \cdot (1 + \alpha \cdot \Theta) = 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0036 \cdot 20) = 2,06 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \quad \{6.1\}$$

Skutečný odpor kontaktního odporu

$$R_s \leq \frac{U_{sv}}{2 \cdot I_m} = \frac{0,3}{1,4 \cdot 10^4} = 2,14 \cdot 10^{-5} \Omega \quad \{6.2\}$$

### 6.4.2 Chlazení přes uzavřený prostor

Oteplení jmenovitým proudem v jističi jsme nuceni řešit, jako problematiku chlazení přes uzavřený prostor, jelikož se nejpodstatnější část proudovodné dráhy nachází ve vzduchu a je uzavřená v polyamidovém krytu. Základním principem chlazení přes uzavřený prostor, je-li proudovodná dráha obklopena plynem v uzavřeném krytu je, že dochází k proudění a tím se zvětšuje jeho klidová tepelná vodivost. Musíme, tudíž zjistit novou ekvivalentní hodnotu tepelné vodivosti. Za pomoci této nové ekvivalentní tepelné vodivosti jsme schopni počítat přestup tepla z teplejší stěny na chladnější. Parametry pro výpočet náhradní tepelné vodivosti vzduchu: rozdíl teplot byl stanoven na 5°C a materiálová konstanta  $C = 0,465$ .

Ekvivalentní hodnota tepelné vodivosti

$$\lambda_e = C \cdot (T_1 - T_2)^{0,25} = 0,465 \cdot 5^{0,25} = 0,71 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \quad \{6.3\}$$

### 6.4.3 Tepelný výpočet přívodu

Průměr připojovacího vodiče byl zvolen z tabulky 5 – 1 na straně 145 z použité literatury č. 6.  $d = 2,5 \text{ mm}^2$ . Délku připojovacího vodiče jsem zvolil 2,1 m a to z důvodu řešení tepelné sítě, kde za tohoto předpokladu můžeme počítat přívodní vodič, jako tepelně dlouhou tyč. Z toho vyplývá, že veškeré teplo, které se ve vodiči vytvoří, se zároveň spotřebuje pouze na jeho oteplení a neovlivní další části dráhy. Tento předpoklad je teoreticky splněn i v elektrické domovní instalaci, kde k hlavnímu domovnímu jističi, vede přívodní vodič o podobné délce. Materiálem vodiče je měď.

Z tabulky 2 - 44 na straně 52 z literatury č. 6, musíme určit součinitel přestupu tepla z povrchu přívodního izolovaného vodiče dle požadovaných podmínek. Prvním ukazatelem je teplota okolí, v našem případě  $T_0 = 35^\circ\text{C}$  a druhým je emisivita  $E_z = 0,8$ . Na základě těchto ukazatelů zvolíme hodnotu měrné chladivosti zářením  $\alpha_z$ .

#### Měrná chladivost zářením

$$\alpha_z = 5,4 + 0,03 \cdot \Theta_p = 5,4 + 0,03 \cdot 20 = 6,06 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad \{6.4\}$$

V dalším kroku výpočtu stanovíme měrnou chladivost konvekcí  $\alpha_k$  a to z podmínky délky příslušné části proudovodné dráhy. U přívodního vodiče je podmínka  $l > 0,3 \text{ m}$ .

#### Měrná chladivost konvekcí

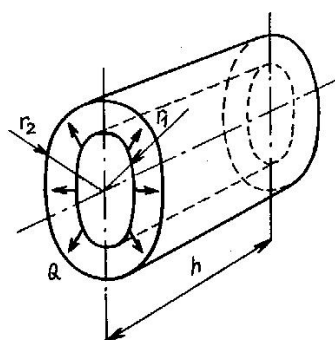
$$\alpha_{k1} = 3 + 0,03 \cdot \Theta_p = 3 + 0,03 \cdot 20 = 3,6 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad \{6.5\}$$

Součtem hodnot měrné chladivosti konvekcí a zářením dostaneme celkovou hodnotu chladivosti.

#### Celková chladivost

$$\alpha_{kz1} = \alpha_z + \alpha_{k1} = 3,6 + 6,06 = 9,66 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad \{6.6\}$$

Tepelný odpor přívodního vodiče CY 2,5 mm počítáme pomocí vztahu pro válcové mezikruží. Z katalogů výrobců vodičů zjistíme parametry zvoleného typu vodiče. Tloušťka izolace je potřebná pro výpočet tepelného odporu přívodního vodiče a materiál izolace k určení měrné tepelné vodivosti  $\lambda_i$ . Hodnota je uvedena v tabulce 2 – 64 na straně 184 z literatury č. 6.



Obr. 16 - Řešení při výpočtu válcového mezikruží [6]

Tepelný odpor izolace

$$R_{T1} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_i \cdot l} = \frac{\ln \frac{1,85}{0,9}}{2 \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 2,1} = 0,18 K \cdot W \quad \{6.7\}$$

Výpočet chladičího obvodu přívodního vodiče

$$O_v = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 0,9 = 5,6 mm \quad \{6.8\}$$

$$P_{vod} = O_v \cdot l_v = 5,65 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 = 0,012 m^2 \quad \{6.9\}$$

Výpočet chladičího obvodu izolace přívodního vodiče

$$O_i = 2 \cdot \pi \cdot r = 11,6 mm \quad \{6.10\}$$

$$P_i = O_i \cdot l_i = 11,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 = 0,024 m^2 \quad \{6.11\}$$

Jelikož nenastává výměna tepla mezi konci dílce, jedná se o tepelně dlouhou tyč. Z tohoto předpokladu plynou vztahy pro určení veličin náhradního tepelného schématu.

Měrná chladivosti na povrchu izolace

$$\alpha_{01} = \frac{1}{P_{\text{vod}} \cdot \left( R_{ij} + R_{tp} + \frac{1}{\alpha_{kz1} \cdot P_{\text{vně}}} \right)}$$

$$\alpha_{01} = \frac{1}{0,012 \left( 0,18 + \frac{1}{9,66 \cdot 0,0244} \right)} = 19 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad \{6.12\}$$

Veličiny náhradního  $\pi$  článku tepelně dlouhé tyče

$$\delta = \sqrt{\alpha_{01} \cdot O_V \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{Cu}} = \sqrt{19 \cdot 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot 385 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6}} = 0,018 \quad \{6.13\}$$

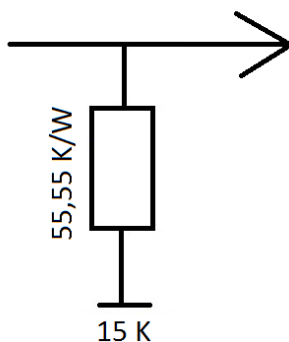
Celkový tepelný odpor v příčné (transversální) větvi

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{0,018} = 55,55 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.14\}$$

Jestliže vzniká v daném úseku proudovodné dráhy tepelný příkon, vzniklý průtokem proudu, mění se oteplení koncových bodů příčných větví a to na hodnotu  $\Theta_{\infty}$ .

Oteplení koncových bodů příčných větví

$$\Theta_{\infty 1} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_{01} \cdot P_V} = \frac{\rho \cdot I^2}{\alpha_{01} \cdot O_V \cdot S_V} = \frac{2,06 \cdot 10^{-8} \cdot 25^2}{19 \cdot 0,018 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6}} = 15 \text{ K} \quad \{6.15\}$$



Obr. 17 - Tepelné schéma přívodního vodiče

#### 6.4.4 Tepelný výpočet svorky

Výpočet celkové chladiivosti je počítán dle zmíněných podmínek v kapitole č. 6.4.3. Parametry pro zvolení hodnoty měrné chladiivosti zářením se nemění ( $E_z = 0,8$  ;  $T_0 = 35^\circ\text{C}$ ). Měrná chladiivost konvekcí je zvolena pro velikost dílce do 5 cm.

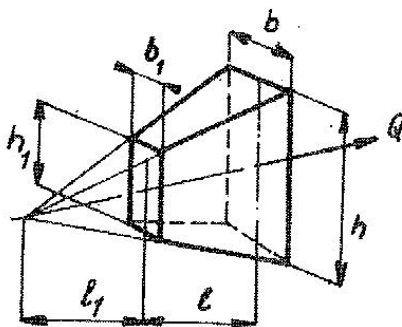
##### Výpočet celkové chladiivosti

$$\alpha_z = 5,4 + 0,03 \cdot \Theta_p = 5,4 + 0,03 \cdot 20 = 6,06 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad \{6.16\}$$

$$\alpha_{k2} = 4,3 + 0,055 \cdot \Theta_p = 4,3 + 0,055 \cdot 20 = 5,4 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad \{6.17\}$$

$$\alpha_{kz2} = \alpha_z + \alpha_{k2} = 6,06 + 5,4 = 11,46 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad \{6.18\}$$

Nyní je počítán teplotní odpor vzduchu a následně teplotní odpor polyamidového krytu. Pro výpočet tepelného odporu vzduchu musíme uvažovat, směr unikajícího tepla z proudovodné dráhy. Na základě toho určíme geometrický útvar odpovídající prostoru, kterým bude daný dílec odvádět své teplo. Výsledný tvar je komolý jehlan, který řešíme následujícím způsobem.



Obr. 18 - Řešení výpočtu komolého jehlan [6]

##### Tepelný odpor vzduchu

$$l_1 = \frac{l \cdot b_1}{b - b_1} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-2}}{1,75 \cdot 10^{-2} - 1,6 \cdot 10^{-2}} = 2,13 \cdot 10^{-2} \text{ m} \quad \{6.19\}$$

$$R_{TJ} = \frac{(l + l_1) \cdot l}{\lambda \cdot b \cdot h \cdot l_1} = \frac{(2 \cdot 10^{-3} + 2,13 \cdot 10^{-3}) \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0,71 \cdot 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2,13 \cdot 10^{-2}} = 8,8 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.20\}$$

Tepelná vodivost polyamidu je určena z literatury č. 6 na straně 184 z tabulky 2 - 64. Hodnoty pro výpočet tepelného odporu krytu jističe:  $l = 1,2 \text{ mm}$ ,  $h = 20 \text{ mm}$ ,  $b = 17,5$ ,  $\lambda = 0,25$ .

Plocha přestupu tepla krytem jističe

$$\begin{aligned} S &= h \cdot b \\ S &= 20 \cdot 17,5 = 350 \text{ mm}^2 = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad \{6.21\}$$

Tepelný odpor krytu jističe

$$R_{T-\text{polyamid}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{0,25} \cdot \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 10^{-4}} = 13,71 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.22\}$$

Ochlazovací plocha svorky

$$P_{\text{vod}} = P_1 + P_2 + P_3 = (14 \cdot 8) + (8 \cdot 3) + (1,5 \cdot 11) = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad \{6.23\}$$

Ochlazovací plocha krytu jističe

$$P_{\text{vně}} = S \quad \{6.24\}$$

Náhradní měrná tepelná vodivost

$$\begin{aligned} \alpha_{02} &= \frac{1}{P_{\text{vod}} \cdot \left( R_{\text{fj}} + R_{\text{tp}} + \frac{1}{\alpha_{\text{kz2}} \cdot P_{\text{vně}}} \right)} \\ \alpha_{02} &= \frac{1}{1,53 \cdot 10^{-4} \cdot \left( 8,8 + 13,71 + \frac{1}{11,4 \cdot 3,5 \cdot 10^{-4}} \right)} = 24 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned} \quad \{6.25\}$$

Veličiny náhradního  $\pi$  článku

$$\delta = \sqrt{\alpha_{02} \cdot O_V \cdot \lambda_{\text{Cu}} \cdot S_{\text{Cu}}} = \sqrt{24 \cdot 9 \cdot 10^{-3} \cdot 385 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5}} = 3,35 \cdot 10^{-2} \quad \{6.26\}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_2 \cdot O_V}{\lambda \cdot S_{\text{Cu}}}} = \sqrt{\frac{24 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{385 \cdot 1,35 \cdot 10^{-5}}} = 6,45 \quad \{6.27\}$$



$$\beta l = \beta \cdot l = 6,45 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2} = 0,09 \quad \{6.28\}$$

Celkový tepelný odpor v podélné (longitudinální) větvi

$$R_{\text{tl}} = \frac{\sinh \beta l}{\delta} = \frac{\sinh 0,09}{3,35 \cdot 10^{-2}} = 2,7 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.29\}$$

Celkový tepelný odpor v příčné (transversální) větvi

$$R_{\text{tr}} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh \frac{\beta \cdot l}{2}} = \frac{1}{3,35 \cdot 10^{-2} \cdot \tanh \frac{0,09}{2}} = 661,63 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.30\}$$

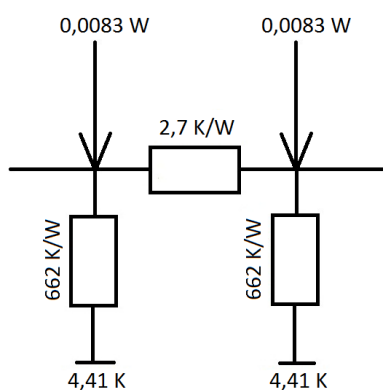
Oteplení koncových bodů příčných větví

$$\Theta_{\infty 2} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_{02} \cdot P_V} = \frac{\rho \cdot I^2}{\alpha_{02} \cdot O_V \cdot S_V} = \frac{2,06 \cdot 10^{-8} \cdot 25^2}{24 \cdot 9 \cdot 10^{-3} \cdot 1,35 \cdot 10^{-5}} = 4,41 \text{ K} \quad \{6.31\}$$

Do tepelné sítě zahrnujeme i teplo, které vzniká v důsledku spoje mezi šroubem a přívodním vodičem, odpor tohoto styku je řešen v kapitole 6.4.10. Celková hodnota se dosazuje jako tepelný výkon přivedený na longitudinální větev.

Tepelný výkon

$$P = R \cdot I^2 = 2,65 \cdot 10^{-5} \cdot 25^2 = 0,0165 \text{ W} \quad \{6.32\}$$



Obr. 19 - Tepelná síť svorky

### 6.4.5 Tepelný výpočet zkratové spouště

Celkovou chladiivost vypočítáme dle podmínek uvedených v kapitole 6.4.3.

#### Výpočet celkové chladiivosti

$$\alpha_z = 5,4 + 0,03 \cdot \Theta_p = 5,4 + 0,03 \cdot 20 = 6,06 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.33\}$$

$$\alpha_{k3} = 4,3 + 0,055 \cdot \Theta_p = 4,3 + 0,055 \cdot 20 = 5,4 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.34\}$$

$$\alpha_{kz3} = \alpha_z + \alpha_{k2} = 6,06 + 5,4 = 11,46 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.35\}$$

Prostor odvádějící teplo vypočítáme komolým jehlanem dle kapitoly 6.4.5.

#### Tepelný odpor vzduchu

$$R_{TJ} = \frac{(l + l_1) \cdot l}{\lambda \cdot b \cdot h \cdot l_1} = \frac{(1,8 \cdot 10^{-2} + 3,93 \cdot 10^{-2}) \cdot 1,8 \cdot 10^{-2}}{0,71 \cdot 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 3,93 \cdot 10^{-2}} = 70,42 K \cdot W^{-1} \quad \{6.36\}$$

$$l_1 = \frac{l \cdot b_1}{b - b_1} = \frac{1,8 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-2}}{1,75 \cdot 10^{-2} - 1,2 \cdot 10^{-2}} = 3,93 \cdot 10^{-2} m \quad \{6.37\}$$

#### Plocha přestupu tepla krytem jističe

$$S = h \cdot b$$
$$S = 30 \cdot 17,5 = 525 mm^2 = 5,25 \cdot 10^{-4} m^2 \quad \{6.38\}$$

#### Tepelný odpor krytu jističe

$$R_{T-polyamid} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{0,25} \cdot \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{5,25 \cdot 10^{-4}} = 9,14 K \cdot W^{-1} \quad \{6.39\}$$

Ochlazovací plocha zkratové spouště

$$P_{\text{vod}} = b_1 \cdot b = 12 \cdot 17,5 = 2,04 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad \{6.40\}$$

Ochlazovací plocha krytu jističe

$$P_{\text{vně}} = S \quad \{6.41\}$$

Náhradní měrná tepelná vodivost

$$\alpha_{03} = \frac{1}{P_{\text{vod}} \cdot \left( R_{ij} + R_{ip} + \frac{1}{\alpha_{kz3} \cdot P_{\text{vně}}} \right)}$$
$$\alpha_{03} = \frac{1}{2,04 \cdot 10^{-4} \cdot \left( 70,42 + 9,14 + \frac{1}{11,4 \cdot 5,25 \cdot 10^{-4}} \right)} = 19,87 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

{6.42}

Veličiny náhradního  $\pi$  článku

$$\delta = \sqrt{\alpha_{03} \cdot O_V \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{Cu}} = \sqrt{19,87 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 385 \cdot 5,34 \cdot 10^{-4}} = 2,21 \cdot 10^{-1} \quad \{6.43\}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_{03} \cdot O}{\lambda \cdot S}} = \sqrt{\frac{19,87 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2}}{385 \cdot 5,34 \cdot 10^{-4}}} = 1,08 \quad \{6.44\}$$

$$\beta l = \beta \cdot l = 1,08 \cdot 1,7 \cdot 10^{-2} = 18,36 \cdot 10^{-3} \quad \{6.45\}$$

Celkový tepelný odpor v podélné (longitudinální) větvi

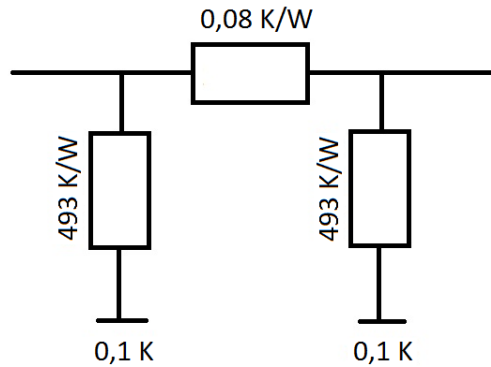
$$R_{\pi} = \frac{\sinh \beta l}{\delta} = \frac{\sinh 0,018}{2,21 \cdot 10^{-1}} = 0,08 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.46\}$$

Celkový tepelný odpor v příčné (transversální) větvi

$$R_{TT} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh \frac{\beta \cdot l}{2}} = \frac{1}{2,21 \cdot 10^{-1} \cdot \tanh \frac{0,02}{2}} = 493 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.47\}$$

#### Oteplení koncových bodů příčných větví

$$\Theta_{\infty 3} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_{03} \cdot P_V} = \frac{\rho \cdot I^2}{\alpha_{03} \cdot O_V \cdot S_V} = \frac{2,06 \cdot 10^{-8} \cdot 25^2}{19,87 \cdot 2,21 \cdot 10^{-1} \cdot 5,34 \cdot 10^{-4}} = 0,1 K \quad \{6.48\}$$



Obr. 20 - Tepelné schéma zkratové spouště

### 6.4.6 Tepelný výpočet pevného kontaktu

#### Celková chladivost

$$\alpha_z = 5,4 + 0,03 \cdot \Theta_p = 5,4 + 0,03 \cdot 20 = 6,06 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.49\}$$

$$\alpha_{k4} = 7 + 0,12 \cdot \Theta_p = 7 + 0,12 \cdot 20 = 9,4 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.50\}$$

$$\alpha_{kz4} = \alpha_z + \alpha_{k4} = 6,06 + 9,4 = 15,46 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.51\}$$

#### Tepelný odpor vzduchu

$$R_{TJ} = \frac{(l + l_1) \cdot l}{\lambda \cdot b \cdot h \cdot l_1} = \frac{(3 \cdot 10^{-2} + 1,57 \cdot 10^{-2}) \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{0,71 \cdot 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 1,57 \cdot 10^{-2}} = 586,85 K \cdot W^{-1} \quad \{6.52\}$$

$$l_1 = \frac{l \cdot b_1}{b - b_1} = \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{1,75 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-3}} = 1,57 \cdot 10^{-2} m \quad \{6.53\}$$

Plocha přestupu tepla krytem jističe

$$\begin{aligned} S &= h \cdot b \\ S &= 12 \cdot 17,5 = 210 \text{ mm}^2 = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad \{6.54\}$$

Tepelný odpor krytu jističe

$$R_{T-\text{polyamid}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{0,25} \cdot \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{2,1 \cdot 10^{-4}} = 22,86 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.55\}$$

Ochlazovací plocha pevného kontaktu

$$P_{\text{vod}} = b_1 \cdot b = 6 \cdot 5 = 30 \text{ mm}^2 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad \{6.56\}$$

Ochlazovací plocha krytu jističe

$$P_{\text{vně}} = S \quad \{6.57\}$$

Náhradní měrná tepelná vodivost

$$\begin{aligned} \alpha_{04} &= \frac{1}{P_{\text{vod}} \cdot \left( R_{ij} + R_{ip} + \frac{1}{\alpha_{kz4} \cdot P_{\text{vně}}} \right)} \\ \alpha_{04} &= \frac{1}{3 \cdot 10^{-5} \cdot \left( 586,9 + 22,86 + \frac{1}{15,4 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4}} \right)} = 36,27 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned} \quad \{6.58\}$$

Veličiny náhradního  $\pi$  članku

$$\delta = \sqrt{\alpha_{04} \cdot O_V \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{Cu}} = \sqrt{36,27 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 385 \cdot 6 \cdot 10^{-6}} = 2,24 \cdot 10^{-2} \quad \{6.59\}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_{04} \cdot O}{\lambda \cdot S}} = \sqrt{\frac{36,27 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{385 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}} = 9,71 \quad \{6.60\}$$

$$\beta l = \beta \cdot l = 9,71 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,05 \quad \{6.61\}$$

Celkový tepelný odpor v podélné (longitudinální) větvi

$$R_{Tl} = \frac{\sinh \beta l}{\delta} = \frac{\sinh 0,05}{2,24 \cdot 10^{-2}} = 2,17 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.62\}$$

Celkový tepelný odpor v příčné (transversální) větvi

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh \frac{\beta \cdot l}{2}} = \frac{1}{2,24 \cdot 10^{-2} \cdot \tanh \frac{0,05}{2}} = 1838 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.63\}$$

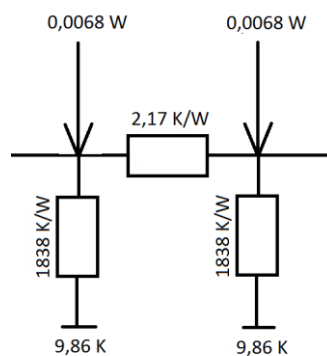
Oteplení koncových bodů příčných větví

$$\Theta_{\infty 4} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_{04} \cdot P_V} = \frac{\rho \cdot I^2}{\alpha_{04} \cdot O_V \cdot S_V} = \frac{2,06 \cdot 10^{-8} \cdot 25^2}{36,26 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-6}} = 9,86 \text{ K} \quad \{6.64\}$$

Do tepelné sítě je nutné zavést i teplo vzniklé při kontaktním styku.

Tepelný výkon v kontaktním styku

$$P = R \cdot I^2 = 2,14 \cdot 10^{-5} \cdot 25^2 = 0,0134 \text{ W} \quad \{6.65\}$$



Obr. 21 - Tepelné schéma pevného kontaktu

### 6.4.7 Tepelný výpočet pohyblivého kontaktu

#### Celková chladivost

$$\alpha_z = 5,4 + 0,03 \cdot \Theta_p = 5,4 + 0,03 \cdot 20 = 6,06 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.66\}$$

$$\alpha_{k5} = 4,3 + 0,055 \cdot \Theta_p = 4,3 + 0,055 \cdot 20 = 5,4 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.67\}$$

$$\alpha_{kz5} = \alpha_z + \alpha_{k5} = 6,06 + 5,4 = 11,46 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.68\}$$

#### Tepelný odpor vzduchu

$$R_{TJ} = \frac{(l + l_1) \cdot l}{\lambda \cdot b \cdot h \cdot l_1} = \frac{(2,7 \cdot 10^{-2} + 5,59 \cdot 10^{-3}) \cdot 2,7 \cdot 10^{-2}}{0,71 \cdot 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 5,59 \cdot 10^{-3}} = 845 K \cdot W^{-1} \quad \{6.69\}$$

$$l_1 = \frac{l \cdot b_1}{b - b_1} = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{17,5 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}} = 5,59 \cdot 10^{-3} m \quad \{6.70\}$$

#### Plocha přestupu tepla krytem jističe

$$S = h \cdot b$$
$$S = 15 \cdot 17,5 = 262 mm^2 = 2,6 \cdot 10^{-4} m^2 \quad \{6.71\}$$

#### Tepelný odpor krytu jističe

$$R_{T-polyamid} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{0,25} \cdot \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{2,63 \cdot 10^{-4}} = 18,29 K \cdot W^{-1} \quad \{6.72\}$$

#### Ochlazovací plocha pohyblivého kontaktu

$$P_{vod} = b_1 \cdot b = 3 \cdot 13 = 39 mm^2 = 3,9 \cdot 10^{-5} m^2 \quad \{6.73\}$$

#### Ochlazovací plocha krytu jističe

$$P_{vne} = S \quad \{6.74\}$$

### Náhradní měrná tepelná vodivost

$$\alpha_{05} = \frac{1}{P_{vod} \cdot \left( R_{tj} + R_{tp} + \frac{1}{\alpha_{kzs} \cdot P_{vně}} \right)} \quad \{6.75\}$$
$$\alpha_{05} = \frac{1}{3,9 \cdot 10^{-5} \cdot \left( 845 + 18,3 + \frac{1}{11,4 \cdot 2,63 \cdot 10^{-4}} \right)} = 21,4 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$$

### Veličiny náhradního $\pi$ článku

$$\delta = \sqrt{\alpha_{05} \cdot O_V \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{Cu}} = \sqrt{21,41 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 385 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5}} = 1,72 \cdot 10^{-2} \quad \{6.76\}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_{05} \cdot O_V}{\lambda \cdot S}} = \sqrt{\frac{21,41 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{385 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5}}} = 3,73 \quad \{6.77\}$$

$$\beta l = \beta \cdot l = 3,73 \cdot 1,3 \cdot 10^{-2} = 0,05 \quad \{6.78\}$$

### Celkový tepelný odpor v podélné (longitudinální) větvi

$$R_{tl} = \frac{\sinh \beta l}{\delta} = \frac{\sinh 0,05}{1,72 \cdot 10^{-2}} = 2,81 K \cdot W^{-1} \quad \{6.79\}$$

### Celkový tepelný odpor v příčné (transversální) větvi je

$$R_{TT} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh \frac{\beta \cdot l}{2}} = \frac{1}{1,72 \cdot 10^{-2} \cdot \tanh \frac{0,05}{2}} = 2395 K \cdot W^{-1} \quad \{6.80\}$$

### Oteplení koncových bodů

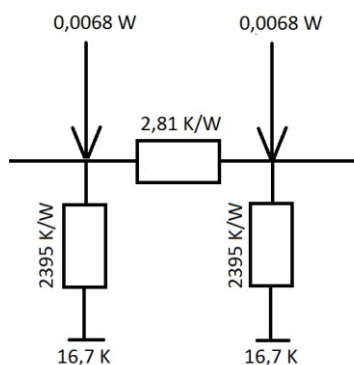
$$\Theta_{\infty 5} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_{05} \cdot P_V} = \frac{\rho \cdot I^2}{\alpha_{05} \cdot O_V \cdot S_V} = \frac{2,06 \cdot 10^{-8} \cdot 25^2}{21,41 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^{-5}} = 16,7 K \quad \{6.81\}$$

I zde zahrneme teplo vzniklé v kontaktním styku.



#### Tepelný výkon kontaktního styku

$$P = R \cdot I^2 = 2,14 \cdot 10^{-5} \cdot 25^2 = 0,0134 W \quad \{6.82\}$$



Obr. 22 - Tepelné schéma pohyblivého kontaktu

### 6.4.8 Tepelný výpočet bimetalové spouště

#### Celková chladiivost

$$\alpha_z = 5,4 + 0,03 \cdot \Theta_p = 5,4 + 0,03 \cdot 20 = 6,06 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.83\}$$

$$\alpha_{k7} = 4,3 + 0,055 \cdot \Theta_p = 4,3 + 0,055 \cdot 20 = 5,4 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.84\}$$

$$\alpha_{kz7} = \alpha_z + \alpha_{k7} = 6,06 + 5,4 = 11,46 W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \quad \{6.85\}$$

#### Tepelný odpor vzduchu

$$R_{TJ} = \frac{(l + l_1) \cdot l}{\lambda \cdot b \cdot h \cdot l_1} = \frac{(2,5 \cdot 10^{-2} + 7,41 \cdot 10^{-3}) \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}{0,71 \cdot 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,7 \cdot 10^{-2} \cdot 7,41 \cdot 10^{-3}} = 237,9 K \cdot W^{-1} \quad \{6.86\}$$

$$l_1 = \frac{l \cdot b_1}{b - b_1} = \frac{2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{17,5 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}} = 7,41 \cdot 10^{-3} m \quad \{6.87\}$$

Plocha přestupu tepla krytem jističe

$$S = h \cdot b$$
$$S = 37 \cdot 17,5 = 647 \text{ mm}^2 = 6,47 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad \{6.88\}$$

Tepelný odpor krytu jističe

$$R_{T-\text{polyamid}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{0,25} \cdot \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{6,47 \cdot 10^{-4}} = 7,42 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.89\}$$

Ochlazovací plocha pohyblivého kontaktu

$$P_{\text{vod}} = b_1 \cdot b = 4 \cdot 35 = 140 \text{ mm}^2 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad \{6.90\}$$

Ochlazovací plocha krytu jističe

$$P_{\text{vně}} = S \quad \{6.91\}$$

Náhradní měrná tepelná vodivost

$$\alpha_{07} = \frac{1}{P_{\text{vod}} \cdot \left( R_{ij} + R_{tp} + \frac{1}{\alpha_{kz7} \cdot P_{\text{vně}}} \right)}$$
$$\alpha_{07} = \frac{1}{1,4 \cdot 10^{-4} \cdot \left( 237 + 7,42 + \frac{1}{11,4 \cdot 6,47 \cdot 10^{-4}} \right)} = 18,75 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad \{6.92\}$$

Veličiny náhradního  $\pi$  članku

$$\delta = \sqrt{\alpha_{07} \cdot O_V \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{Cu}} = \sqrt{18,75 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 385 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} = 1,07 \cdot 10^{-2} \quad \{6.93\}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_{07} \cdot O}{\lambda \cdot S}} = \sqrt{\frac{18,75 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{385 \cdot 4 \cdot 10^{-6}}} = 6,98 \quad \{6.94\}$$

$$\beta l = \beta \cdot l = 6,98 \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} = 0,24 \quad \{6.95\}$$

Celkový tepelný odpor v podélné (longitudinální) větvi

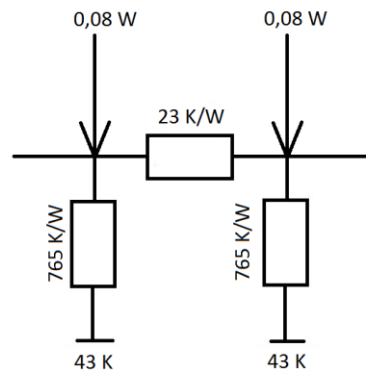
$$R_{Tl} = \frac{\sinh \beta l}{\delta} = \frac{\sinh 0,24}{1,07 \cdot 10^{-2}} = 22,95 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.96\}$$

Celkový tepelný odpor v příčné (transversální) větvi

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh \frac{\beta \cdot l}{2}} = \frac{1}{1,07 \cdot 10^{-2} \cdot \tanh \frac{0,24}{2}} = 765,61 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad \{6.97\}$$

Oteplení koncových bodů

$$\Theta_{\infty 7} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_{07} \cdot P_V} = \frac{\rho \cdot I^2}{\alpha_{07} \cdot O_V \cdot S_V} = \frac{2,06 \cdot 10^{-8} \cdot 25^2}{18,75 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-6}} = 42,91 \text{ K} \quad \{6.98\}$$



Obr. 23 - Tepelné schéma bimetalové spouště

### 6.4.9 Tepelný výpočet spoje lankových vodičů

Tepelný výpočet lankových vodičů počítáme dle problematiky tepelných výpočtů neurčitého tvaru. To znamená, že stanovíme odpor dílce a ztráty na něm vzniklé, které se zahrnou do řešení tepelné sítě viz. Obr. 23.

$$R_{lv} = \rho \cdot \frac{l_{lv}}{S_{lv}} = 2,06 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 10^{-6}} = 0,13 \cdot 10^{-3} \Omega \quad \{6.99\}$$

$$P = R \cdot I^2 = 0,13 \cdot 10^{-3} \cdot 25^2 = 0,08 W \quad \{6.100\}$$

### 6.4.10 Tepelný výpočet šroubového spoje

Přítlačná síla ve spojích přírodních kabelů bude vyvozována šroubem M 5 s průměrem jádra  $d_j = 4\text{mm}$ . Dovolené namáhání materiálu šroubu  $\delta_d = 30\text{ MPa}$  bude:

$$F_p^* = 2 \cdot \delta_d \cdot \frac{\pi \cdot d_j^2}{4} = 2 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot \frac{\pi \cdot 0,004^2}{4} = 753,98 \doteq 754\text{ N} \quad \{6.101\}$$

Během životnosti jističe dojde k jistému opotřebení (otlačení ploch) a skutečná přítlačná síla klesne až na 50 %. Po té budeme uvažovat skutečnou přítlačnou sílu jako:

$$F_p \approx 0,5 \cdot F_p^* = 0,5 \cdot 754 = 377\text{ N} \quad \{6.102\}$$

#### Odpor šroubového spoje

$$R_{spoj} = \frac{k}{F^n} = \frac{0,01}{377} = 2,65 \cdot 10^{-5} \Omega \quad \{6.103\}$$

Je nutné poznamenat, že šrouby použité při montáži jističe nesmí být závitořezné.

[6]

## 6.5 Tepelná síť

Sestavenou jednořadovou tepelnou síť řešíme numericky iterační metodou, při čemž postupujeme následovně: zvolíme hodnotu oteplení  $\Theta_1$  na začátku sítě a výpočtem pokračujeme až na konec, respektive k podélné větvi přívodu druhého konce sítě. Celé řešení se děje na základě uzlové rovnice. Tepelná síť spínacích přístrojů končí z obou stran přívody. Přívodní vodiče většinou mají nižší dovolené oteplení než je oteplení samotné proudovodné dráhy. Díky tomu se podílí na chlazení přístroje. Hodnoty pro výpočet jsou uvedeny v kapitole 6.4 a oteplení na začátku sítě volíme  $\Theta_1 = 19 \text{ K}$ .

### 6.5.1 Výpočet 1. uzlu tepelné sítě

Výpočet toku tepelného výkonu

$$\Delta\Theta = \Theta_1 - \Theta_{\infty 1} = 19 - 15 = 4 \text{ K} \quad \{7.1\}$$

$$Q_1 = \frac{\Delta\Theta}{R_{T1}} = \frac{4}{56} = -0,07 \text{ W} \quad \{7.2\}$$

Znaménko mínus definuje tok výkonu z uzlu.

$$\Delta\Theta = \Theta_1 - \Theta_{\infty 2} = 19 - 4,4 = 14,6 \text{ K} \quad \{7.3\}$$

$$Q_2 = \frac{\Delta\Theta}{R_{T2}} = \frac{14,6}{662} = -0,022 \text{ W} \quad \{7.4\}$$

Znaménko mínus definuje tok výkonu z uzlu.

$$Q_{uzlu} = \sum Q = -0,07 - 0,022 + 4,15 \cdot 10^{-3} = -0,087 \text{ W} \quad \{7.5\}$$

Z výsledku je patrné, že z uzlu výkon odtéká, a proto volíme směr výkonu na  $R_{u1}$  do uzlu, ve výpočtu to znázorňujeme znaménkem mínus. Výkon v uzlu je tudíž nulový a výpočet pokračuje řešením tepelných toků v druhém uzlu. Celá tepelná síť je zobrazena v příloze č. 2 Schéma tepelné sítě.

## 6.6 Principiální návrh zhášecí komory

Z důvodu omezení zkratového proudu řešíme zhášení oblouku v jističi jako problematiku vypínání stejnosměrného proudu. Podmínkou úspěšného vypnutí stejnosměrného oblouku je velké obloukové napětí, čehož docílíme zvětšením jeho odporu. Výsledné napětí by mělo být větší než napětí zdroje. Celý výpočet je pouze orientační a jeho přesnost se musí ověřit na zkušebně, kde v dnešní době probíhá kompletní návrh zhášecí komory na základě experimentu.

Základním vztahem je rovnice paní Ayrtonové popisující vliv délky a materiálových konstant na velikost napětí mezi elektrodami.

Rovnice Ayrtonové

$$U_{u0} = \alpha + \beta \cdot l + \frac{\gamma + \delta \cdot l}{I} \quad \{8.1\}$$

Hodnoty pro výpočet určené z literatury č. 7:

$$\alpha = 15 \text{ V}$$

$$\beta = 1\,000 \text{ V/m}$$

$$\gamma = 22 \text{ W}$$

$$\delta = 15\,000 \text{ W/m}$$

$$n = 17$$

$$l = 20 \text{ mm}$$

Rovnici jsme rozšířili o veličinu  $n$ , která představuje počet žebér roštové komory.

$$U_{u0} = \alpha \cdot n + \beta \cdot l + \frac{\gamma \cdot n + \delta \cdot l}{I}$$

$$U_{u0} = 15 \cdot 17 + 1000 \cdot 0,02 + \frac{22 \cdot 17 + 15000 \cdot 0,2}{10000} = 275 \text{ V} \quad \{8.2\}$$

Výsledné napětí je při zapálení oblouku větší než napětí zdroje, dojde k omezení zkratového proudu.

## 7 Závěr

Na začátku celého projektu jsem zvolil základní rozměry 1. pólového jističe  $I_n = 25 \text{ A}$ , vyšel jsem z modulární řady drobných jističů, které jsou na dnešním trhu s elektroinstalačním materiálem. Velikosti povrchových cest a vzdušných vzdáleností přístrojů nízkého napětí udává norma ČSN EN 60898 – 1. Na základě těchto rozměrů jsem nakreslil výkres (Rozměry 1. pólového jističe).

Dále jsem pokračoval tvorbou proudovodné dráhy, rozměry jednotlivých dílů (svorky, zkratové spouště, pevného kontaktu, pohyblivého kontaktu, lankových vodičů a bimetalové spouště), vycházejí z jističů společnosti OEZ Letohrad řady Minia. Celá proudovodná dráha je namodelována v programu SolidWorks. Výkresy jednotlivých dílců vytvořené taktéž v programu SolidWorks jsou přiloženy v příloze. Z vymodelované dráhy jsem vytvořil tzv. výpočtový model, dle kterého je počítána celá část diplomové práce zaměřená na elektrodynamické účinky zkratového proudu. Na výkrese výpočtového modelu je patrné, že se celá proudovodná dráha jističe určitým způsobem zjednodušuje. Prvním zjednodušením je nahrazení svorky za přímý vodič o délce  $l = 16,5 \text{ mm}$  a průměru  $d = 2 \text{ mm}$ , k tomuto kroku nás vede nejednoznačné určení jednotlivých proudnic. Řešení, tohoto problému se nachází ve vymodelování součástí a provedení výpočtu v softwaru ANSYS. Výpočet cívky elektromagnetické spouště je možný na základě magnetické indukce určené z vektorového potenciálu, avšak řešením vektorového potenciálu pole kruhového závitů vede na eliptické integrály 1. a 2. typu, z čehož opět vyplývá, že přesnějších výsledků docílíme pouze použitím numerických metod. V tomto případě nahrazuji celou zkratovou spoušť přímým vodičem o délce  $l = 25 \text{ mm}$  a průměru  $d = 2 \text{ mm}$ . Pevný kontakt je reprezentován, profilovým vodičem o rozměrech  $a = 6 \text{ mm}$ ,  $b = 5 \text{ mm}$ ,  $c = 1 \text{ mm}$ . Pohyblivý kontakt je opět zjednodušen a to způsobem, že ho považuji za rovný profilový vodič a jeho skutečné prohnutí nerespektuji. Lankové vodiče, které nalezneme v jističích obvykle na dvou místech a to, že spojují bimetal s pohyblivým kontaktem a s výstupní svorkou. Jsou vymodelovány jako neizolované plné měděné vodiče o průměru  $d = 2 \text{ mm}$  a délce  $l = 20 \text{ mm}$ . Samotná bimetalová spoušť je definována jako profilový vodič o rozměrech  $a = 4 \text{ mm}$ ,  $b = 35 \text{ mm}$ ,  $c = 1 \text{ mm}$ . Ve výpočtu elektrodynamických účinků dynamického zkratového proudu  $I_D = 10\,000 \text{ A}$ , se snažím zjistit výslednou působící sílu na kontaktní styk, pomocí exaktních vzorců. Výsledná hodnota pro zvolený zkratový proud je  $F = -59,33 \text{ N}$ . Znaménko mínus definuje směr působící síly a to, že síla při zkratu o této velikosti bude působit proti kontaktnímu přítlaku.

V další kapitole se snažím ověřit celkové oteplení jističe při průchodu jmenovitého proudu  $I_n = 25$  A. Tepelnou problematiku jsem řešil včetně polyamidového krytu jističe, z čehož vyplývá použití výpočtových vzorců pro chlazení přes uzavřený prostor. Ochlazovací plochu krytu jističe jsem stanovil pouze na přední stranu, z čehož vyplývá chladicí obvod  $O_v = 17,5$  mm. Výpočtem jsem ověřil, že se jističe mohou instalovat v rozvaděčích na DIN lištu vedle sebe. Délku přírodního vodiče jsem stanovil na  $l = 2,1$  m a to z důvodu, že z tohoto předpokladu plynou vztahy pro řešení tepelně dlouhé tyče. To znamená, že nám teoreticky přírodní vodič tepelně neovlivňuje samotný jistič, a že veškeré teplo na něm vytvořené spotřebuje pouze pro vlastní oteplení. Dále jsou prvky počítány jako tepelně krátké tyče až na lankové vodiče, které jsem uvažoval jako prvky neurčitého tvaru a jejich vliv na oteplení je řešen přivedením vzniklých ztrát do tepelné sítě. Po výpočtu celé tepelné sítě mohu konstatovat, že dovolené oteplení  $\Theta$  je 19 K.

Principiální návrh zhášecí komory jsem provedl pomocí Ayrtonové rovnice, kterou jsem rozšířil o prvek  $n$  definující potřebný počet žebířů zhášecí komory. Po zvolení hodnoty  $n = 17$ , se hodnota obloukového napětí dostává na hodnotu  $U_{n0} = 275$  V. Při této hodnotě mohu konstatovat, že napětí na oblouku překročí napětí zdroje a proto, dojde k omezení zkratového proudu.

Porovnání výsledků návrhu s jističi na dnešním trhu mohu provést pouze z oblasti kontaktního přitlaku, na základě diplomové práce Ing. Petra Slavička, který řešil modelování elektrodynamických sil na modulárním jednopólovém jističi LSN při dynamickém zkratovém proudu  $I_D = 14$  kA. Výsledná kontaktní síla byla spočtena na hodnotu  $F = -87,9$  N. Výsledek je úměrný hodnotě, kterou jsem dosáhl exaktním výpočtem.

Při dalších postupech řešení problematiky elektrodynamických sil a tepelných účinků doporučuji využití výpočetní techniky. Hardware musí být dostatečný vzhledem k náročnosti modelovaných sestav. Celkové řešení spočívá v použití metody konečných prvků a využití softwaru, jako již výše zmiňovaný program ANSYS nebo WORKBENCH. Touto metodou lze docílit přesnějších výsledků, a to na základě definování jednotlivých parametrů což znamená, že nemusíme zjednodušovat ani svorku či zkratovou spoušť.



## 8 Použitá literatura

- [1] HAVELKA, O. *Elektrické přístroje*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 440 s.
- [2] HELŠTÝN, D., KAČOR, P., HYTKA, Z. *Elektrické přístroje spínací ochranné a jistící*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2003, 216 s., ISBN 80-248-0315-1
- [3] HAVELKA, O. *Elektrické přístroje I*. Praha: SNTL, 1974, 318 s.
- [4] BUL' B, K., a kol. *Elektrické přístroje*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 544s.
- [5] HAVELKA, O. *Stavba elektrických přístrojů I*. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně, 1984, 262 s., ISBN 55-650-84
- [6] HAVELKA, O., a kol. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů*. Brno: VUT Brno, 1985, 186 s.
- [7] GROSS, B., a kol. *Laboratorní a numerická cvičení z elektrických přístrojů*. Brno: VUT Brno, 1983, 145 s.
- [8] RUSNĚK, Š., ŘEZÁČEK, P. *Elektrické přístroje I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001, 155 s. ISBN 80-7082-825-0
- [9] TAJEV, I. S. *Elektrické apparaty upravlenija*. Moskva, 1969
- [10] ČSN EN 60898-1, *Elektrická příslušenství – Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalací – Část 1: Jističe pro střídavý provoz (AC)*
- [11] URL: <<http://www.oez.cz>>
- [12] URL: <<http://www.schneider-electric.cz>>

## 9 Příloha

Seznam příloh:

I.	Rozměry 1. Pólového jističe	(výkres)
II.	Schéma tepelné sítě	(výkres)
III.	První část horní svorky	(výkres)
IV.	Druhá část horní svorky	(výkres)
V.	Vinutí zkratové spouště	(výkres)
VI.	Pohyblivý kontakt	(výkres)
VII.	Model lankového vodiče pohyblivý kontakt – bimetal	(výkres)
VIII.	Model lankového vodiče bimetal – svorka	(výkres)
IX.	Bimetalová spoušť	(výkres)
X.	První část dolní svorky	(výkres)
XI.	Model jističe	(model)